

Sensibilidad del ensayo Fénix sobre mezclas densas. Efecto del contenido de betún.

Treball realitzat per:

Joan Marc Cassany Biosca

Dirigit per:

Rodrigo Miró Recasens

Grau en:

Ingeniería de Obras Públicas

Barcelona, 9/6/2018

Departamento de Ingeniería civil y ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

AGRADECIMIENTOS

Hoy día 8/6/2019 será una fecha que recordaré toda mi vida, después de muchos sacrificios y horas de trabajo entrego mi TFG y doy por finalizados mis estudios. Han sido unos años muy duros pero también de muchos aprendizajes y sobretodo de demostrarme a mi mismo que puedo con todo si lucho por ello.

Me gustaria agradecer a mi familia todo lo que ha hecho por mi durante esta etapa. A mi hermana Mia que siempre ha estado allí apoyándome y animándome con una sonrisa, las horas de tren dónde me ayudaba a repasar para el siguiente examen no las olvidaré nunca. A mi madre por ser la persona mas trabajadora del mundo, sin ella nada de esto habría sido posible. Por último a mi padre que ha sido mi incondicional, siempre ha estado atento a mis exámenes, mis resultados y me ha animado en los buenos y malos momentos.

Dar las gracias a Adriana Martinez Reguero por todas las horas que ha dedicado a mi TFG, su paciencia y sobretodo por haber estado siempre dispuesta a ayudarme en cualquier momento. Es una profesional ejemplar y una profesora de las que dejan huella.

Para terminar dar las gracias a los compañeros que he conocido durante estos años en la UPC, en especial a mi gran amigo Albert Ferré Soler que ha estado siempre a mi lado y con el que he compartido triunfos, fracasos y sobretodo muy buenas experiencias.

RESUMEN

Título: Sensibilidad del ensayo Fénix sobre mezclas densas. Efecto del contenido de betún.

Autor: Joan Marc Cassany Biosca.

Tutor: Rodrigo Miró.

La fisuración en las capas bituminosas de las carreteras es un problema constante. Los firmes de carreteras están formados por varias capas, aportando estabilidad estructural y comodidad a los usuarios. La capa de rodadura, la superior, es la que se ve más afectada por las solicitaciones del tráfico y los efectos medioambientales, como las diferencias de temperatura. Son estos factores los que pueden propiciar la aparición de fisuras.

Este trabajo final de grado (TFG) se basa en el empleo del ensayo Fénix; se trata de un ensayo a tracción capaz de evaluar el proceso de fisuración producido sobre muestras asfálticas, desarrollado por el Laboratorio de Caminos de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). El nombre de ensayo Fénix proviene del acrónimo de un proyecto de investigación llamado “Investigación Estratégica en carreteras más Seguras y Sostenibles” en el cual participó el grupo de investigación del Laboratorio y tuvo oportunidad de desarrollar e implementar el ensayo.

El ensayo Fénix es capaz de caracterizar y explicar los mecanismos de deterioro, a partir de diferentes parámetros que determinan la respuesta de las mezclas bituminosas. En este TFG se estudia la sensibilidad del ensayo a la variación de un parámetro característico de la mezcla, que es el contenido de betún.

Se han fabricado probetas de mezclas bituminosas de granulometría continua, tipo AC16S con un betún convencional 50/70 y tres contenidos diferentes de betún: 4%, 4,75% y 5,5%. Las probetas se han ensayado a dos temperaturas, 5°C y 20°C, para evaluar la respuesta de las mezclas a temperaturas bajas e intermedias. Una vez realizado el ensayo Fénix, se han llevado a cabo una serie de pruebas estadísticas para determinar la repetibilidad del mismo, así como para evaluar la sensibilidad de los siguientes parámetros: contenido de huecos, la resistencia a tracción (RT), el índice de resistencia a tracción (IRT), la energía de fractura (GF) y el desplazamiento al 50% de la carga máxima (d0,5Pm).

Los resultados han mostrado que la resistencia, el índice de rigidez a tracción y la energía de fractura son sensibles al contenido de betún. Tanto la resistencia a tracción como la energía de fractura muestran una clara tendencia a aumentar con el contenido de betún, a ambas temperaturas. En el caso del índice de rigidez a tracción, esta diferencia sólo se ha podido confirmar a 20°C en cuanto al parámetro desplazamiento al 50% de la carga máxima, si bien se aprecia que aumenta con el

mayor contenido de betún, las diferencias no se han confirmado como estadísticamente significativas.

ABSTRACT

Title: Fénix test sensitivity on dense bituminous mixtures. Effect of bitumen content

Author: Joan Marc Cassany Biosca.

Tutor: Rodrigo Miró.

Cracking of bituminous layers of road pavements is a constant problem. The road pavements are formed by several layers, providing structural stability and comfort to users. The wearing course, the upper layer, is the one that is most affected by traffic stresses and environmental effects, such as temperature differences. These are the factors that can cause the appearance of cracks.

This final degree project (TFG) is based on the use of the Fénix test. It is a tensile test capable of evaluating the cracking process produced on asphalt samples, and was developed by the Roadway Research Laboratory of the Polytechnic University of Catalonia (UPC). The Fénix test name comes from the acronym of a research project called "Strategic Research on Safer and Sustainable Roads" in which the Laboratory's research group participated and had the opportunity to develop and implement the testing device.

The Fénix test is able to characterize and explain the mechanisms of deterioration, from different parameters that determine the response of bituminous mixtures. In this TFG, the sensitivity of the test to the variation of a characteristic parameter of the mixture, which is the bitumen content, is studied.

Test specimens of bituminous mixtures of continuous gradation, type AC16S with a conventional bitumen 50/70 and three different contents of bitumen have been manufactured: 4%, 4.75% and 5.5%. The test specimens were tested at two temperatures, 5°C and 20°C, to evaluate the response of the mixtures at low and intermediate temperatures. Once the Fénix test has been carried out, a series of statistical tests have been carried out to determine its repeatability, as well as to evaluate the sensitivity of the following parameters: void content, tensile strength (RT), tensile strength (IRT), fracture energy (GF) and displacement at 50% of the maximum load (d0,5Pm).

The results have shown that the strength, the tensile stiffness index and the fracture energy are sensitive to the bitumen content. Both the tensile strength and the fracture energy show a clear trend to increase with the bitumen content, at both temperatures. In the case of the tensile stiffness index, this difference could only be confirmed at 20°C in terms of the displacement parameter at 50% of the maximum load, although it

can be seen that it increases with the higher bitumen content, the differences have not been confirmed as statistically significant.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	7
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO	2
CAPITULO 2. ESTADO DEL ARTE	4
2.1. Introducción	4
2.2. Mezclas bituminosas en caliente	4
2.2.1. Clasificación y nomenclatura de las mezclas.....	5
2.2.2. Composición mezclas AC.....	6
2.3. Fisuración de los firmes.....	8
2.3.1. Fisuración longitudinal.	8
2.3.2. Fisuración transversal.....	9
2.3.3. Fisuración de borde.....	10
2.3.4. Fisuración por fatiga.....	10
2.3.5. Fisuración por reflexión de juntas.....	11
2.3.6. Fisuración en bloque.	12
2.4. Ensayos a tracción sobre mezclas bituminosas.....	13
2.4.1. Semi-circular Bending Test (SCB)	13
2.4.2. Indirect Tensile Test (IDT).....	14
2.4.3. Ensayo Cataluña Tracción Directa (CTD)	15
2.4.4. Ensayo de Barcelona Tracción Directa (BTD)	16
2.4.5. Disk-Shaped Compact Tension Test (DCT)	17
2.4.6. Ensayo Fénix.....	18
CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL	20
3.1. Plan de trabajo	20
3.3. Materiales empleados.....	21
3.3.1. Áridos	21
3.3.2. Filler	22
3.3.3. Betún	23
3.4. Tareas previas a la fabricación	24
3.5. Fabricación	27
3.6. Densidad y contenido de huecos	29

3.7. Ensayo Fénix.....	31
3.7.1. Introducción y descripción	31
3.7.2. Procedimiento del ensayo Fénix	34
3.7.3. Procesamiento de datos.....	37
CAPÍTULO 4. TEST ESTADÍSTICOS	38
4.1. Test de Grubbs'	38
4.2. Descripción estadística.....	38
4.3. Límite de repetibilidad	39
4.4. Test de Normalidad (Kolmogorov-Smirnov)	39
4.5. Test de Bartlett.....	40
4.6. Test de Levene.....	41
4.7. ANOVA.....	41
5.1. Estadística descriptiva	43
5.2. Contenido de huecos.....	45
5.3. Parámetros del ensayo Fénix	46
5.3.1. Resistencia a tracción (RT)	46
5.3.2. Índice de rigidez a tracción (IRT)	48
5.3.3. Energía de fractura (GF)	50
5.3.4. Desplazamiento del 50% de la carga post-pico (d0,5Pm)	52
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	55
6.1. Ensayo de densidades y análisis de contenido de huecos	55
6.2. Ensayo Fénix.....	55
REFERENCIAS.....	58

ÍNDICE DE ANEJOS

ANEJO 1

Resultados del ensayo Fénix – curvas carga-desplazamiento.....60

ANEJO 2

Resumen de resultados.....72

ANEJO 3

Análisis de normalidad.....75

ANEJO 4

Análisis de homocedasticidad y ANOVA de un solo factor.....85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 fisuración longitudinal.....	9
Figura 2.2. Fisuración transversal.....	9
Figura 2.3. Fisuración de borde.....	10
Figura 2.4. Fisuración por fatiga.....	11
Figura 2.5. Fisuración por reflexión de juntas.....	12
Figura 2.6. Fisuración en bloque.....	12
Figura 2.7. Semi-circular bending test.....	14
Figura 2.8. Carga Indirect Tensile Test.....	14
Figura 2.9. Cámara del ensayo CTD.	16
Figura 2.10. Ensayo Barcelona Tracción Directa.....	16
Figura 2.11. Ensayo DCT.....	17
Figura 2.12. Esquema ensayo Fénix.....	18
Figura 2.13. Gráfico Carga-Desplazamiento del ensayo Fénix.....	19
Figura 3.1. Plan de trabajo.....	20
Figura 3.1. Árido grueso.....	22
Figura 3.2. Filler.....	22
Figura 3.3. Betún.....	23
Figura 3.4. Tamizadora y capazos con distintos tamaños de árido.....	25
Figura 3.5. Tamizado árido retenido en el tamiz 0,063mm.....	25
Figura 3.6. Pesado de áridos.....	26
Figura 3.7. Filler.....	26
Figura 3.8. Proceso de fabricación de una probeta.....	28
Figura 3.9. Compactadora Marshall.....	28

Figura 3.10. Gato hidráulico y probetas Marshall fabricadas.....	29
Figura 3.11. Áridos desgranados.....	30
Figura 3.12. Gráfica Carga-Desplazamiento ensayo Fénix.....	32
Figura 3.13. Probeta Fénix.....	35
Figura 3.14. Resina y retardador.....	35
Figura 3.15. Probetas pegadas en las placas debidamente alineadas.....	36
Figura 3.16. Rotura de la probeta en el ensayo Fénix.....	37
Figura 3.17. Probeta antes y después de ser ensayada.....	37
Figura 5.1. Huecos-Contenido de betún.....	47
Figura 5.2. Resistencia-Contenido de betún.....	48
Figura 5.3. Índice de rigidez a tracción-Contenido de betún.....	50
Figura 5.4. Energía de fractura-Contenido de betún.....	52
Figura 5.5. Desplazamiento del 50% de la carga post-pico -Contenido de betún.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Usos granulométricos de las distintas mezclas bituminosas tipo AC.....	6
Tabla 3.1. Granulometría de la mezcla AC16S.....	22
Tabla 3.2. Requisitos de los betunes asfálticos convencionales.....	23
Tabla 3.3. Cálculos granulométricos.....	24
Tabla 3.4. Datos procesados para AC16S a 5 °C y 5,75% de porcentaje de betún.....	38
Tabla 4.1. Media, Dest. Est., IC (95%).....	39
Tabla 5.1. Criterios de diseño propuestos para las mezclas tipo AC.....	44
Tabla 5.2. Parámetros AC16S 4% a 20 °C.....	44
Tabla 5.3. Parámetros AC16S 4% a 5 °C.....	45
Tabla 5.4. Parámetros AC16S 4,75% a 20 °C.....	45
Tabla 5.5. Parámetros AC16S 4,75% a 5 °C.....	45
Tabla 5.6. Parámetros AC16S 5,5% a 20 °C.....	45
Tabla 5.7. Parámetros AC16S 5,5% a 5 °C.....	45
Tabla 5.8. Categorías de tráfico pesado.....	46
Tabla 5.9. Agrupación según el contenido de Huecos.....	47
Tabla 5.10. Agrupación según la Resistencia a 20 °C.....	48
Tabla 5.11. Agrupación según la Resistencia a 5 °C.....	49
Tabla 5.12. Agrupación según el IRT a 20 °C.....	50
Tabla 5.13. Agrupación según el IRT a 5 °C.....	51
Tabla 5.14. Agrupación según la GF a 20 °C.....	52
Tabla 5.15. Agrupación según la GF a 5 °C.....	53

Tabla 5.16. Agrupación según el d0,5Pm a 20 °C.....	54
Tabla 5.17. Agrupación según el d0,5Pm a 5 °C.....	55

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

Se denomina infraestructura a aquella realización humana diseñada y dirigida por profesionales de arquitectura, ingeniería civil, urbanistas, etc., que sirve para el desarrollo de otras actividades y su funcionamiento, necesario en la organización de las ciudades.

El vocablo es utilizado habitualmente como sinónimo de obra pública, por haber sido el estado el encargado de su construcción y mantenimiento, en razón de la utilidad pública y de los costes de ejecución, generalmente elevados.

Las infraestructuras se pueden caracterizar en cinco grupos.

- Infraestructuras de transporte: terrestre, marítimo y aéreo.
- Infraestructuras hidráulicas: redes de agua potable, redes de desagüe, redes de reciclaje.
- Infraestructuras de edificación: vivienda, salud, educación, etc.
- Infraestructuras energéticas: redes de electricidad, redes de energía, redes de combustible, etc.
- Infraestructuras de telecomunicaciones: redes de telefonía fija, fibra óptica, repetidoras, etc.

La necesidad de todas estas infraestructuras es básica para nuestra sociedad. El buen funcionamiento de ellas exige una calidad mínima. Para garantizar esta calidad se necesitan estudios previos que permitan prever el comportamiento de las infraestructuras frente a las solicitudes que se verán expuestas.

Hablando específicamente de las infraestructuras de transporte y en especial las viales, se sabe que en la Unión Europea, la mayoría de los desplazamientos de pasajeros es por carretera y que un gran porcentaje del transporte de mercancías también se realiza por tierra. El transporte viario es fundamental para el desarrollo social y económico de la sociedad. Por este motivo es esencial garantizar un buen estado de las infraestructuras viales, ya que tendrán una relación directa sobre su uso. Se debe proporcionar un uso vial seguro, confortable y con capacidad de soportar elevados esfuerzos debidos al flujo de movilidad.

El elemento básico de las infraestructuras viales es el firme, que en función de los materiales que lo componen, puede ser de tipo flexible, semi-rígido o rígido. Los dos

primeros tipos de firmes son los comúnmente empleados en las carreteras de España. Estos firmes están compuestos por una serie de capas. La capa superior se denomina capa de rodadura, la cual exige una calidad superior ya que debe tener unas óptimas propiedades de rodadura y antideslizantes al estar en contacto directo con el tráfico. A continuación se encuentra la capa intermedia, compuesta por una mezcla bituminosa (esta capa puede no existir, cuando el pavimento es inferior a 8 cm). La siguiente capa es la capa de base, que tiene una funcionalidad estructural. Entre estas capas se coloca un riego de adherencia, que es la aplicación de una emulsión bituminosa, con objeto de garantizar un comportamiento monolítico de toda la estructura.

Todas estas capas que conforman el firme de la carretera, en especial la capa de rodadura que tiene contacto con el neumático, pueden verse afectadas por solicitaciones medioambientales y del tráfico. Esto obligará a realizar tareas de mantenimiento rutinario para evitar su deterioro o bien intervenir para su reparación.

Las tareas de mantenimiento o reparación provocan un colapso de la vía a reparar, afectando a la movilidad que proporcionan a sus usuarios, además de un mayor coste económico. Por estos motivos es lógico que se deba hacer un estudio previo de los materiales a usar para dimensionar y construir el firme.

Uno de los deterioros típicos que sufren los firmes de carreteras son las fisuras que poco a poco se van propagando y pueden alcanzar dimensiones considerables, afectando seriamente el estado del firme. Por este motivo es muy importante realizar ensayos a los materiales que ocuparán las capas del firme para poder conocer con exactitud las propiedades de dicho material cuando se somete a solicitaciones similares a las que tendrá en servicio.

Uno de estos ensayos es el ensayo Fénix, el que se ha utilizado en este trabajo final de grado, cuyo objetivo es analizar y determinar el comportamiento de las mezclas bituminosas frente al fenómeno de fisuración. Cuando se diseñan mezclas bituminosas en España se tienen en cuenta parámetros tales como la densidad o el contenido de huecos, la resistencia a la acción del agua y la resistencia a las deformaciones permanentes, pero hasta el momento no se ha definido un ensayo que sea capaz de evaluar la resistencia a la fisuración. El ensayo Fénix constituye una iniciativa desarrollada en la Universidad Politécnica de Cataluña enfocada a abordar este tema.

1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO

El objeto de este TFG es estudiar la sensibilidad del ensayo Fénix para analizar la resistencia a la fisuración que puede soportar una mezcla bituminosa. Específicamente, se analizarán y compararán mezclas bituminosas continuas de tipo AC-16S, con diferente cantidad de betún convencional 50/70 (4%, 4,75% y 5,5% sobre

mezcla) a dos temperaturas de ensayo (5°C y 20°C), para simular el comportamiento a temperaturas bajas e intermedias.

Una vez ensayadas todas las probetas con el ensayo Fénix, los resultados obtenidos serán evaluados estadísticamente para poder determinar el grado de sensibilidad que tiene dicho ensayo frente a cada una de las variables estudiadas.

Además, se analizarán los parámetros proporcionados por el ensayo Fénix en función del contenido de ligante y se compararán con los límites propuestos para el diseño de mezclas bituminosas resistentes a la fisuración, siempre respetando el artículo 542 del pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG3).

CAPITULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción

En este capítulo se pone al lector en situación para que refresque los conocimientos básicos para poder entender lo que se ha realizado y estudiado en este trabajo.

El estado del arte se basa en la lectura de proyectos, artículos, publicaciones, normativas, etc., que hacen referencia al ensayo Fénix y a la fisuración de las mezclas bituminosas según el contenido de betún y la temperatura.

2.2. Mezclas bituminosas en caliente

Las mezclas bituminosas en caliente consisten en una combinación de un betún asfáltico, áridos, polvo mineral y, en muchas ocasiones aditivos, de manera que todas las partículas queden envueltas de forma continua y homogénea.

Las ventajas de las mezclas bituminosas para los firmes de carretera son la regularidad superficial que pueden dar a los pavimentos de cierto espesor, la seguridad proporcionada por las resistencias al deslizamiento y su puesta en obra en espesores diversos. Los inconvenientes fundamentales son una durabilidad sensiblemente inferior a la vida útil del firme y que la rigidez de estas mezclas varía con la temperatura.

Para la fabricación de las mezclas bituminosas, los áridos se clasifican en fracciones uniformes, a partir de los cuales se compone la granulometría elegida. Se considera por separado el filler o fracción que pasa por el tamiz 0.063 mm. Los áridos utilizados en las mezclas pueden ser de origen natural, artificial o árido reciclado, pero aquellos destinados a la capa de rodadura, deben garantizar que sus partículas tengan una elevada resistencia al pulimiento, fragmentación y desgaste para soportar el efecto agresivo del tráfico así como el contacto más directo con agentes ambientales.

El principal componente de una mezcla bituminosa es el ligante bituminoso, este aglomera los áridos, da cohesión y estabilidad a la mezcla. Los ligantes bituminosos además dan flexibilidad y deformabilidad a la mezcla. Hay diferentes tipos de ligantes bituminosos, betunes asfálticos y betunes modificados. Mediante la adición de polímeros, caucho, asfaltos naturales u otro tipo de compuestos se pueden modificar los betunes asfálticos para obtener betunes con propiedades mejoradas.

2.2.1. Clasificación y nomenclatura de las mezclas.

Los firmes se clasifican según la normativa española 6.1 IC sobre secciones de firmes en:

- Firmes Flexibles: son los constituidos por capas granulares no tratadas y materiales bituminosos de un espesor inferior a 15 cm.
- Firmes Semiflexibles: en los que el espesor de los materiales bituminosos sobre capas granulares no tratadas iguala o supera los 15 cm.
- Firmes Semirígidos: constituidos por materiales bituminosos en cualquier espesor sobre una o más capas tratadas con conglomerantes hidráulicos o puzolánicos, siendo el espesor conjunto de éstas igual o superior a 18 cm.
- Firmes rígidos: constituidos por pavimentos de hormigón, generalmente losas, que se pueden colocar directamente sobre la explanada o bien sobre una capa soporte que puede estar tratada o no.
- Otros firmes: constituidos a base de adoquines, losas, aceras, etc.

Las mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso o AC (del inglés Asphalt Concrete) tienen la nomenclatura establecida en la norma UNE-EN-13108-1. Esta designación se complementa con información del tipo de granulometría que corresponda a la mezcla: densa, semidensa o gruesa, con el objetivo de poder diferenciar mezclas con el mismo tamaño máximo de árido, pero con usos granulométricos diferentes. Para ello, a la designación establecida en la norma UNE-EN-13108-1 se le añadirá la letra D, S o G después de la indicación del tamaño máximo de árido.

AC	D	Surf/bin/base	ligante	granulometría
----	---	---------------	---------	---------------

Donde:

- AC: Asphalt concrete, indica que la mezcla es de tipo hormigón bituminoso.
- D: indica el tamaño del árido, expresado como la abertura del tamiz que deja pasar entre un noventa y un cien por cien del total del árido.
- Surf/bin/base: indican si la mezcla se va a emplear en capa de rodadura, intermedia o base, respectivamente.
- Se debe incluir la designación del tipo de ligante hidrocarbonato utilizado.
- D, S o G: indicaran el tipo de granulometría correspondiente a una mezcla densa, semidensa o gruesa respectivamente. En el caso de mezclas de alto módulo se añaden además las letras MAM. {1}

La granulometría del árido obtenido combinando las distintas fracciones de los áridos, según la unidad de obra o empleo, debe estar comprendida dentro de alguno de los usos fijados en la tabla 2.1.

TABLA 542.8 HUSOS GRANULOMÉTRICOS CERNIDO ACUMULADO (% en masa)

TIPO DE MEZCLA (*)		ABERTURA DE LOS TAMICES. NORMA UNE-EN 933-2 (mm)									
		45	32	22	16	8	4	2	0,500	0,250	0,063
Densa	AC16 D			100	90-100	64-79	44-59	31-46	16-27	11-20	4-8
	AC22 D		100	90-100	73-88	55-70		31-46	16-27	11-20	4-8
Semidensa	AC16 S			100	90-100	60-75	35-50	24-38	11-21	7-15	3-7
	AC22 S		100	90-100	70-88	50-66		24-38	11-21	7-15	3-7
	AC32 S	100	90-100		68-82	48-63		24-38	11-21	7-15	3-7
Gruesa	AC22 G		100	90-100	65-86	40-60		18-32	7-18	4-12	2-5
	AC32 G	100	90-100		58-76	35-54		18-32	7-18	4-12	2-5

Tabla 2.1. Usos granulométricos de las distintas mezclas bituminosas tipo AC.

El tipo de mezcla bituminosa en caliente a emplear en función del tipo y espesor de la capa del firme viene definida en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, así como la dotación mínima de ligante y la relación ponderal recomendable entre el contenido de polvo mineral y de ligante.

2.2.2. Composición mezclas AC

Las mezclas bituminosas están compuestas por ligante, áridos y aditivos. A continuación se describe cada uno de los componentes de las mezclas bituminosas.

2.2.2.1. Áridos

Los áridos son fragmentos de roca (de entre 0,08 y 80 mm) de origen mineral y pueden ser de distinto origen y tipo. Los áridos presentan una elevada resistencia mecánica y una gran estabilidad desde el punto de vista químico.

Hay tres tipos fundamentales de áridos según su origen:

- Áridos naturales: se consiguen a través de un yacimiento. Por su naturaleza pueden tener forma redondeada o formas angulosas causadas por el machaqueo. Puede haber áridos naturales provenientes de rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas.

- Áridos reciclados: se obtienen de los escombros y también de los residuos derivados de las demoliciones.

- Áridos artificiales: se obtienen a partir de acometer algún tipo de proceso industrial en cuestión.

Además, también se pueden clasificar los áridos por su tamaño, de este modo se tiene a los áridos gruesos que son los que serán retenidos en el tamiz 2 mm (de la serie de tamices según la norma UNE-EN 933-2:1996) y los áridos finos serán los que pasan por el tamiz 2 mm y que queden retenidos en el tamiz 0.063 mm.

2.2.2.2. Ligante bituminoso

Como ya se ha comentado anteriormente, el ligante es el responsable de proporcionar cohesión y estabilidad a la mezcla además de aglomerar los áridos. El ligante hidrocarbonado es un producto viscoso, de color oscuro, termoplástico y con buena adhesividad con los áridos.

Hay varios tipos de ligante:

- Betún asfáltico: son ligantes obtenidos como producto final en las refinerías de petróleo. Son productos bituminosos sólidos o viscosos, naturales o preparados a partir de los hidrocarburos naturales por destilación, oxidación o cracking, que contienen un pequeño porcentaje de productos volátiles. Poseen características aglomerantes y son esencialmente solubles en sulfuro de carbono. Se clasifican por su mayor o menor consistencia en el ensayo de penetración. Por eso se les llama betunes de penetración.

- Betún modificado: son ligantes hidrocarbonados modificados reológicamente usando uno o más polímeros orgánicos. Se denominan en el artículo 212 del PG-3 con las letras PMB (del inglés Polymer Modified Binder) seguidas de tres números; los dos primeros representativos de su penetración mínima y máxima, y el tercero representativo del punto de reblandecimiento.

- Betún fluidificado: son ligantes obtenidos por adición a un betún de fracciones más o menos volátiles, procedentes de la destilación del petróleo. Aparecieron en el mercado para facilitar el empleo de betunes de penetración en situaciones cuando las temperaturas o el tipo de tratamiento exigen unas viscosidades de aplicación menores que las que se obtienen calentando fuertemente el material. Actualmente no se utilizan debido a la alta contaminación ambiental que pueden causar.

- Emulsión bituminosa: son ligantes hidrocarbonados obtenidos de la adición de agua al betún asfáltico. Se emplean para facilitar la puesta en obra del betún disminuyendo su viscosidad y son ideales para aplicarlas en tiempo lluvioso, con áridos húmedos e incluso con temperaturas bajas. Para que la dispersión del betún en el agua sea estable se añaden sustancias que dotan a la emulsión de carácter polar, habiendo así emulsiones aniónicas y catiónicas. Según la polaridad de los áridos, puede ser necesario el uso de un polarizante para poder mejorar la adherencia de la emulsión con el árido. Para que el ligante cumpla el objetivo de aglomerante, debe producirse la separación del agua y el betún; este proceso se denomina rotura y dependiendo de su velocidad se habla de emulsiones de rotura rápida, media y lenta. Actualmente, el PG-3 sólo especifica el uso de las emulsiones catiónicas, porque éstas presentan una buena adhesividad con áridos silíceos y con la mayoría de los calizos. {2}

2.3. Fisuración de los firmes

Lamentablemente la fisuración es habitual en los firmes de carretera. Este tipo de deterioro puede deberse a las cargas que provoca el tráfico, el cambio climatológico o el envejecimiento de los materiales. Estos factores dan lugar a pequeñas fisuraciones que poco a poco se propagan obteniendo una mayor envergadura. La aparición de fisuras en la capa de rodadura afecta a las propiedades reológicas del betún, disminuyendo sus cualidades.

A continuación se describen los tipos de fisuración más comunes y se comentan los diferentes factores que los provocan.

2.3.1. Fisuración longitudinal.

Este tipo de fallo se caracteriza por la aparición de grietas predominantemente paralelas al eje del camino.

Cuando la posición de la grieta se encuentra a lo largo del eje de la calzada se atribuye su causa a una mala ejecución de la junta de construcción longitudinal en el extendido de la mezcla asfáltica. Cuando la grieta aparece localizada en la zona de la huella de paso de los vehículos, su causa se atribuye a problemas en las capas inferiores, capas de base y subbase granular, o bien, a un fallo por fatiga de la mezcla. Finalmente cuando las grietas se localizan en otras posiciones, su origen se le atribuye a contracciones térmicas producidas en el pavimento cuando existen descensos de temperatura.

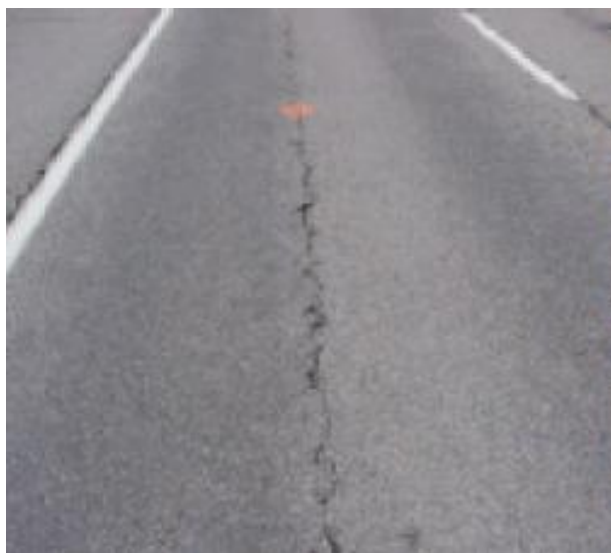


Figura 2.2 fisuracion longitudinal.

2.3.2. Fisuración transversal.

Este tipo de fallo se caracteriza por presentar fisuras aproximadamente normales al eje del camino y se producen sin existir un pavimento de hormigón subyacente. La principal causa atribuida a este tipo de deterioro es el efecto térmico en firmes flexibles con mezclas asfálticas de alta rigidez, en la cual se generan tensiones de tracción en la superficie del pavimento cuando las temperaturas bajan. Otra causa probable es la reflexión de las fisuras existentes en las capas bituminosas inferiores del firme, producto de una mala ejecución en su junta de construcción transversal, o bien, por la reflexión de las fisuras en capas de base tratadas con cemento.



Figura 2.2. Fisuración transversal.

2.3.3. Fisuración de borde.

Este tipo de fisuración se caracteriza por presentar grietas en forma de media luna y se encuentran ubicadas a una distancia no mayor de 0,6 m del borde de la calzada.

Este fallo se produce en los bordes de las capas asfálticas del pavimento que no cuenta con arcenes pavimentados. Su causa se atribuye a una base granular débil por falta de compactación y confinamiento. Otro factor que acelera este tipo de deterioro es la posible infiltración de la humedad, por un drenaje insuficiente que provoca un descenso en la estabilidad de las bases de la estructura del firme.



Figura 2.3. Fisuración de borde.

2.3.4. Fisuración por fatiga.

Este tipo de fallo ocurre generalmente en áreas del pavimento sujeta al impacto de numerosas y repetidas cargas por tráfico, principalmente en la zona de rodadura de la calzada, en la cual la mezcla asfáltica sufre un proceso de fatiga, o pérdida paulatina de sus propiedades estructurales, producto de las cargas reiteradas. Generalmente este tipo de fallo se caracteriza por tener un patrón geométrico descrito por numerosas grietas interconectadas entre sí, formando trozos de ángulos agudos.

La fisuración por fatiga se puede presentar en diferentes niveles de severidad.

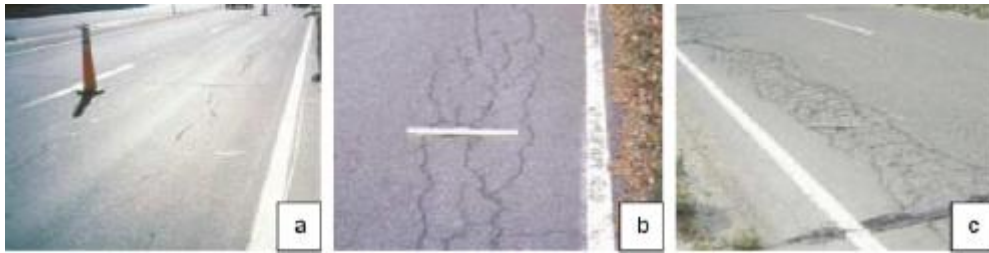


Figura 2.4. Fisuración por fatiga.

Corresponde a un nivel de severidad bajo (a) cuando las fisuras están apenas interconectadas entre sí, y no existe expulsión de finos desde las capas inferiores. El nivel de severidad moderado (b) se presenta con un mayor número de grietas interconectadas y sin presencia de expulsión de finos desde las capas inferiores. Finalmente, el alto grado de severidad (c) se puede observar cuando las grietas están completamente interconectadas, presentando expulsión de finos desde las capas inferiores, y además existen trozos de pavimento desprendidos que se mueven con el paso del tránsito.

Dentro de los deterioros de fisuración por fatiga se pueden identificar dos mecanismos. El primero, en que la fisura progresa desde la capa de base, se conoce como fisura ascendente (bottom-up cracking), o también, fisuración clásica por fatiga. Este fallo se produce por tensiones y deformaciones producto de esfuerzos de tracción en la base de la capa asfáltica, que provoca que la fisura se inicie y se propague hacia la superficie. En el segundo mecanismo, las fisuras se inician y se propagan desde la superficie del pavimento hacia la base y es conocida como fisuración por fatiga descendente (top-down fatigue cracking). Este fallo ocurre generalmente en pavimentos de mayor espesor, a causa de tensiones combinadas de tracción y corte en la superficie del pavimento bituminoso, en la interfase neumático – pavimento, producto del tránsito de vehículos pesados con neumáticos con altas presiones de inflado, sumando también el efecto del envejecimiento de la mezcla asfáltica y el efecto térmico que provoca retracciones en el pavimento cuando las temperaturas bajan.

2.3.5. Fisuración por reflexión de juntas.

Este tipo de fisuración se caracteriza por la aparición de grietas que se producen en las capas asfálticas que refuerzan un pavimento de hormigón, coincidiendo con las juntas y grietas de éste. Estas fisuras progresan a medida que trabajan o se mueven las juntas del pavimento de hormigón ubicado en la capa inferior, reflejándose así la fisura en la superficie. También este tipo de fallo se produce en refuerzos asfálticos sobre antiguas estructuras de pavimentos con fisuras existentes, las cuales se reflejan en la nueva capa de mezcla hacia la superficie. {3}



Figura 2.5. Fisuración por reflexión de juntas.

2.3.6. Fisuración en bloque.

Este tipo de fisuración se caracteriza por presentar fisuras o grietas que conforman una serie de trozos aproximadamente rectangulares, cuyas dimensiones pueden estar comprendidas entre 0,1 y 10 m².

Este tipo de fallo es causado principalmente por las tensiones generadas por diferenciales térmicos, especialmente en mezclas asfálticas con módulos de rigidez muy altos, en las cuales se provocan retracciones superficiales que dan origen a este tipo de fallo. Otras causas posibles se atribuyen a la falta de espesor o fatiga de las capas del firme, falta de capacidad de soporte de la estructura de pavimento, o bien, a una mala ejecución de las capas que componen el pavimento.



Figura 2.6. Fisuración en bloque.

2.4. Ensayos a tracción sobre mezclas bituminosas

En el mundo de las obras públicas es primordial tener en cuenta la fisuración de los materiales que se utilizan, porque pueden ocasionar problemas serios, como los que se han presentado en el apartado anterior. Para evitarlos se debe recurrir a un mantenimiento apropiado, que en ocasiones supone un coste elevado.

La evaluación de la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas, en particular, se realiza a través de ensayos de tracción, como los que se describen a continuación, que permiten obtener parámetros relacionados con el comportamiento de estas mezclas al ser sometidas a esfuerzos.

Si bien estos ensayos son imprescindibles para conocer el comportamiento de los materiales a emplear en la obra y para comprobar si su dimensionamiento es el óptimo para soportar las sollicitaciones a que estarán sometidos, siempre se deberá mantener un control y un mantenimiento de la vía para poder garantizar el buen funcionamiento de la misma.

2.4.1. Semi-circular Bending Test (SCB)

Ensayo desarrollado por la Universidad de Delft para medir la fractura en las mezclas bituminosas debida a las bajas temperaturas. Para este ensayo solo es necesaria media probeta circular, proveniente de la mitad de una probeta cilíndrica estándar (tipo Marshall), con una muesca en el centro que recorre todo el diámetro verticalmente. Este corte crea una zona débil en la probeta, lo que facilita la fisuración y su propagación, por lo que el objeto del estudio es calcular la energía de esta fractura y la resistencia que tiene la probeta a la fractura. Para su realización se somete la mitad de la probeta al ensayo, apoyada en dos cilindros metálicos a los laterales y luego se le aplica una carga al centro con una velocidad de desplazamiento de 0,5 mm/min. En el ensayo se registra la carga y la deflexión (desplazamiento del pistón). Los resultados de energía de fractura se calculan mediante el trabajo disipado en el proceso de fractura obtenido en la curva carga-desplazamiento.

La desventaja del ensayo SCB es que se produce un complejo estado tensional que afecta al proceso de propagación de la fisura debido a los altos esfuerzos de compresión producidos a causa del lugar de aplicación de la carga, generando un efecto de arco con altos esfuerzos de compresión. {4}



Figura 2.7. Semi-circular bending test.

2.4.2. Indirect Tensile Test (IDT)

El ensayo Indirect Tensile Test, en español conocido como el ensayo de tracción indirecta, es uno de los más usados. Se somete a compresión diametral a una probeta cilíndrica que se sitúa horizontalmente entre los platos de una prensa, de forma que los esfuerzos aplicados a la probeta sean sobre dos generatrices opuestas.

Este ensayo aplica una carga conocida, que puede ser simple o repetida, y desarrolla una tensión de tracción uniforme normal a la dirección de dicha carga a lo largo del plano vertical. Finalmente, la probeta sufre un fallo por fractura a lo largo del diámetro vertical.

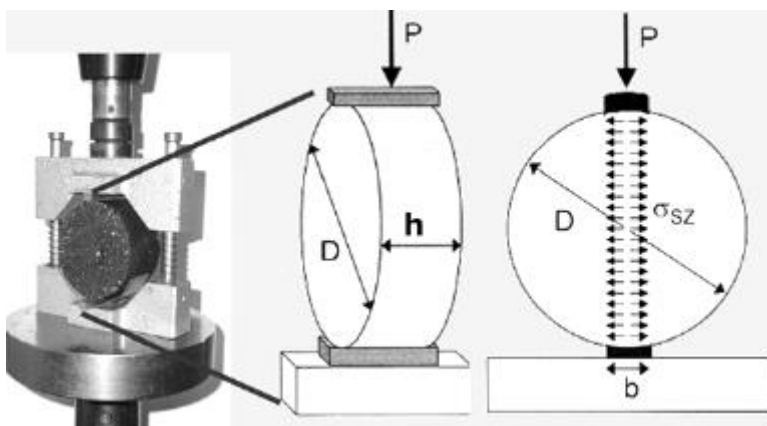


Figura 2.8. Carga Indirect Tensile Test.

Este ensayo se usa para medir la carga de rotura de la probeta, el desplazamiento vertical y la deformación horizontal del diámetro de la probeta durante el tiempo que dura el ensayo.

Las principales ventajas del ensayo según un estudio realizado por el Departamento de Carreteras del Estado de Texas, dirigido por Tomas Kennedy de la Universidad de Austin, son la similitud en cuanto a la geometría de la probeta con otros ensayos (como el Marshall), el hecho de que las condiciones de superficie de la probeta no influyen en la rotura, la probeta y utensilios de ensayo son iguales a los de otros ensayos. Se trata de un ensayo relativamente sencillo, tiene un coeficiente de variación bajo comparado con otros ensayos, puede realizarse bajo carga estática o dinámica, y la rotura tiene origen en un área relativamente uniforme de tensiones a tracción. {5}

2.4.3. Ensayo Cataluña Tracción Directa (CTD)

El ensayo Cataluña Tracción Directa es un ensayo a tracción que se aplica a probetas prismáticas y determina parámetros como la tenacidad y la deformación de rotura. Las muestras pueden ser bien extraídas in-situ o fabricadas en el laboratorio.

Para este ensayo se requiere de probetas prismáticas con un pequeño corte central que se le debe realizar, dónde se le pondrán unos extensómetros que posteriormente servirán para medir la rotura. Una vez obtenidas o fabricadas las muestras, éstas van dentro de una cámara con la capacidad de controlar y regular la temperatura interior, se sujetan por los extremos y se crea una tensión hasta llegar al punto de rotura requerido.

Los extensómetros recogerán los datos provocados en la fisura por unos pistones que son los encargados de crear esta tensión a una velocidad constante de 0,1 mm/min. Quedarán registrados los datos de la carga aplicada y de la deformación sufrida por las cargas tensionales. {6}



Figura 2.9. Cámara del ensayo CTD.

2.4.4. Ensayo de Barcelona Tracción Directa (BTD)

Este ensayo fue desarrollado en el laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña con el objeto de poder evaluar la resistencia a fisuración de las muestras bituminosas de una manera rápida y sencilla. Este ensayo también permite evaluar la resistencia a la fisuración, la tenacidad y el comportamiento de la mezcla durante su rotura.

Para poder realizar el ensayo se sigue un procedimiento específico a la hora de fabricar las probetas. El uso de la compactadora Marshall es esencial, se dispone de un resalto en la parte central para conseguir una probeta con una zona debilitada creando un plano de fisuración. {7}



Figura 2.10. Ensayo Barcelona Tracción Directa.

Este ensayo es de fácil ejecución aunque no se puede clasificar como ensayo de tracción puro, ya que al impacto de la probeta en la entalladura provoca esfuerzos a

compresión, hecho que genera una cierta dificultad a la hora de calcular los parámetros mecánicos. Se presentan dos modos de ensayo, el estático y el dinámico. El primero se usa para determinar la energía y deformación de rotura de la mezcla a partir de una velocidad de deformación fija. El segundo caso, se aplica una carga senoidal de amplitud y frecuencia constante para poder determinar el comportamiento de fatiga.

2.4.5. Disk-Shaped Compact Tension Test (DCT)

Este ensayo fue desarrollado en la Universidad de Illinois y sirve para la obtención de la energía de la fractura de las mezclas asfálticas sobre probetas o testigos cilíndricos a los que se les practica un corte, quedando un par de orificios, como se parecía en la figura 2.12.

Para la sección de la probeta se usa la norma ASTM E399, que describe la geometría utilizada para obtener el plano de fractura en probetas metálicas.



Figura 2.11. Ensayo DCT.

El ensayo DCT permite obtener y determinar, tanto durante el proceso de rotura como al final, la variación de la energía de fractura mecánica al aplicar distintas velocidades en la aplicación de la carga. Se destaca por el gran tamaño en el área de fractura y porque permite también el ensayo de testigos. Aun así, el principal inconveniente es el proceso de fabricación o de puesta a punto para ensayarlo, ya que se requiere un

arduo trabajo en la realización de las muescas y de los orificios circulares, dando pie a posibles pequeñas fisuras las cuales alternarían el resultado del ensayo. {8}

2.4.6. Ensayo Fénix

El ensayo Fénix es objeto de estudio del presente TFG. Es de los ensayos desarrollado más recientemente, fue ideado en la Universidad Politécnica de Cataluña, dentro del marco del Proyecto CENIT: Investigación Estratégica de Carreteras más Seguras y Sostenibles, Acrónimo: FÉNIX. Se realiza a tracción, sobre probetas semicilíndricas con una muesca en el centro que propicia la creación de la fisura. Analiza y determina el comportamiento de las mezclas bituminosas a fractura y la caracterización frente a los fenómenos de fisuración.

Se aplica en probetas semicilíndricas que tienen una ranura en el centro para inducir la fisuración. Una vez cortadas las probetas cilíndricas, se pegan sobre unas placas de acero con un adhesivo específico, dejando una distancia de 5 mm entre ellas. Seguidamente, se depositan en la prensa con unos pasadores en ambos extremos, de manera que quede la probeta en posición vertical.

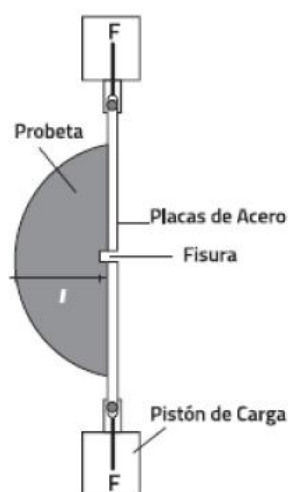


Figura 2.12. Esquema ensayo Fénix.

Cuando todo el conjunto está a una temperatura predeterminada, se empieza el ensayo, donde las placas son traccionadas en sentido vertical a una velocidad constante de 1 mm/min. Así pues, el sistema de adquisición empieza a recoger los datos de carga y desplazamiento.

En el ensayo obtendremos los datos generados por el desplazamiento provocado a causa de la tensión aplicada, dibujando una gráfica con una curva carga-

desplazamiento. En cuanto a los parámetros mecánicos que obtendremos serán la carga máxima a tracción F_{\max} , la Resistencia a tracción R_T , el Índice de Tenacidad IT , el Índice de Rigidez a Tracción IRT , el desplazamiento a carga máxima ΔF_{\max} y el desplazamiento de rotura ΔR . Más adelante, en el capítulo 3 correspondiente a la parte experimental, serán definidos todos estos parámetros. {9}

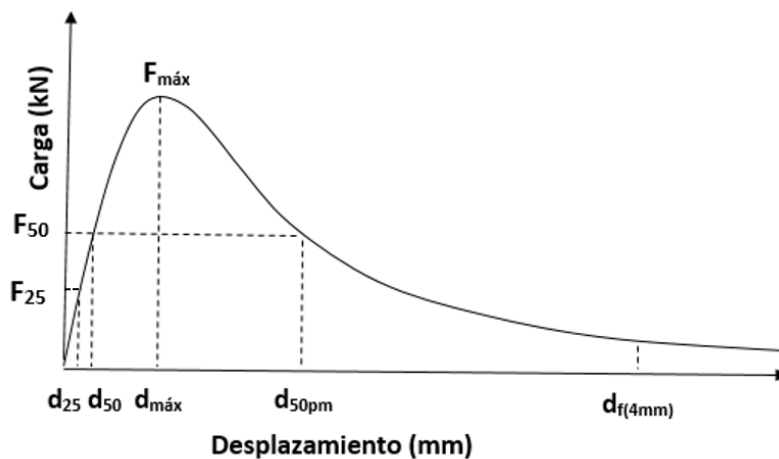


Figura 2.13. Gráfico Carga-Desplazamiento del ensayo Fénix.

Es un ensayo fácil de hacer y por lo tanto, práctico, ya que la elaboración y la puesta a punto de las probetas no requiere mucho esfuerzo. Además, se puede ensayar en un amplio rango de temperaturas y con probetas fabricadas en laboratorio o testigos de la obra.

CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

En este apartado se describe el trabajo realizado en el laboratorio, así como el trabajo de procesamiento de los resultados del ensayo Fénix. La parte experimental de este TFG se ha realizado en el Laboratorio de Caminos del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

3.1. Plan de trabajo

Para la determinación del efecto del contenido de betún en la sensibilidad del ensayo Fénix sobre una mezcla densa, se elaboró un plan de trabajo consistente en la fabricación de 3 series de 16 probetas cilíndricas (tipo Marshall), caracterizadas por la diferencia de porcentaje de betún, 4%, 4,75% y 5,5%, sumando un total de 48 probetas.

Las probetas se cortan por la mitad para poderlas ensayar a dos temperaturas, 5°C y 20°C, que es la otra variable de ensayo.

Cuando ya se han fabricado las probetas, el paso siguiente es determinar la densidad aparente y la densidad máxima para calcular el contenido de huecos de cada probeta. Recién entonces las probetas cilíndricas se cortan al medio para someterlas al ensayo Fénix, quedando un total de 96 mitades de probetas Marshall (en el esquema siguiente, indicada como “probeta F”) que se ensayan a las dos temperaturas planteadas, 5° y 20°C.

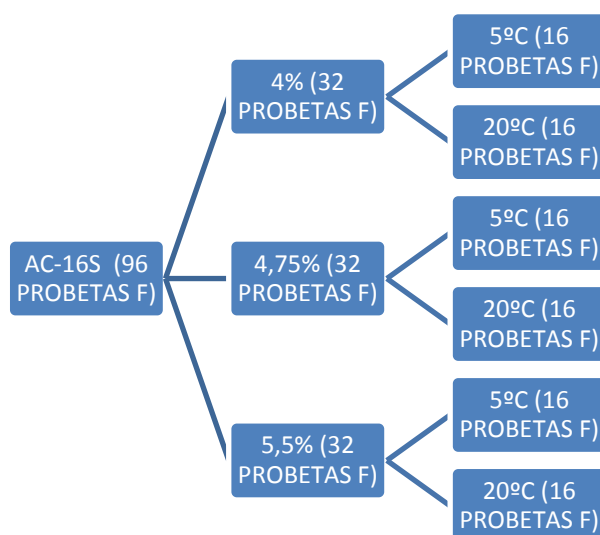


Figura 3.1. Plan de trabajo

Una vez obtenidos los resultados del ensayo Fénix para los diferentes contenidos de betún y temperatura se realiza una comparación entre ellos para ver si estos parámetros presentan diferencias estadísticamente significativas.

Si alguna probeta sufre una rotura o deterioro (por ejemplo, durante el proceso de fabricación o ensayo), ésta se elimina.

3.3. Materiales empleados

Para la fabricación de las probetas se han utilizado unos materiales que cumplen los requerimientos indicados por el PG-3, artículo 542. El tipo de mezcla a estudiar es una AC16S con un betún convencional 50/70.

3.3.1. Áridos

Los áridos utilizados en las muestras se pueden clasificar en dos grupos. Áridos gruesos y finos. Para clasificarlos, el PG-3 artículo 542, nos dice que el tamiz 2 mm es el que delimita si son de un tipo o del otro. El árido que pasa por el tamiz 2 mm se cataloga como árido fino mientras que el que no pasa por dicho tamiz se considera árido grueso.

Los dos tipos de árido utilizados en la elaboración de la mezcla provienen de la Cantera Foj, situada en Vallirana, Barcelona.

Áridos finos

El árido fino utilizado es un calizo, proveniente de rocas calizas. Es un árido hidrófobo, lo que provoca que repele el agua, eso es muy positivo para la mezcla bituminosa de rodadura ya que mejora la adhesividad árido-ligante. Es un árido muy recomendable para la fabricación de mezclas bituminosas ya que presenta una mayor adhesividad en este tipo de mezclas bituminosas.

Áridos gruesos

El árido grueso utilizado en el ensayo es un pórfido, proveniente de rocas filonianas. Este tipo de roca se ha formado a través de la solidificación del magma, por lo tanto han sufrido altas temperaturas. Al enfriarse da lugar a la formación de cristales de feldespato y cuarzo entre otros, con un alto contenido de silicio.



Figura 3.18. Árido grueso.

La granulometría de la mezcla AC16S se indica en la tabla 3.1, está centrada en el huso granulométrico especificado en el Pliego PG-3.

Tamiz (mm)	22	16	8	4	2	0,5	0,25	0,063
Pasa (%)	100	95	67,5	42,5	31	16	11	5

Tabla 3.2. Granulometría de la mezcla AC16S.

3.3.2. Filler

El filler utilizado es un carbonato cálcico. De origen orgánico de naturaleza caliza. Se trata de un compuesto químico que forma parte de la composición de estructuras geológicas.



Figura 3.19. Filler.

3.3.3. Betún

Se ha empleado un betún 50/70 que cumple con las especificaciones indicadas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), que se recogen en la tabla 3.2.

En cuanto a la dotación de betún a añadir a las mezclas, se han fijado tres porcentajes, 4%, 4,75% y 5,5% sobre el total de mezcla.

CARACTERÍSTICA		UNE-EN	UNIDAD	50/70
Penetración a 25 °C		1426	0,1 mm	50/70
Punto de reblandecimiento		1427	°C	46-54
Resistencia al envejecimiento UNE-EN 12607-1	Cambio de masa	12607-1	%	≤ 0,5
	Penetración retenida	1426	%	≥ 53
	Incremento punto reblandecimiento	1427	°C	≤ 10
Índice de penetración		12591 13924 Anexo A<		De -1,5 a + 0,7
Punto de fragilidad Fraass		12593	°C	≤ -8
Punto de inflamación en vaso abierto		ISO 2592	°C	≥ 230
Solubilidad		12592	%	≥ 99,0

Tabla 3.2. Requisitos de los betunes asfálticos convencionales.



Figura 3.20. Betún.

3.4. Tareas previas a la fabricación

- Cálculo de las proporciones de árido para fabricar una probeta

Antes de poder empezar a fabricar las probetas es necesario definir la cantidad de material a emplear. Para ello se parte del peso total de la muestra para que, con la granulometría predefinida que tenemos, se puedan obtener unas probetas de 6 cm para las diferentes mezclas, que es la altura aproximada de las probetas tipo Marshall estandarizada. Haciendo diferentes tanteos para obtener los pesos reales, se define que para una probeta de 6 cm el peso total es de 1100g de mezcla.

A continuación se realizan los cálculos granulométricos para la muestra.

Tamiz	% Pasa	%Retenido	Peso retenido (g)	Peso acumulado (g)	Peso total (g)
22	100	-	-	-	1100
16	95	5%	55	55	
8	67,5	27,5%	302,5	357,5	
4	42,5	25%	275	632,5	
2	31	11,5%	126,5	759	
0,5	16	15%	165	924	
0,25	11	5%	55	979	
0,063	5	6%	66	1045	

Tabla 3.3. Cálculos granulométricos.

- Tamizado de los áridos gruesos y finos.

Para tamizar los áridos se utiliza una tamizadora vibratoria dónde se añaden los tamices con los que se separan los distintos tamaños de árido. En este caso para el árido grueso, se usan los tamices de 11,2; 8; 5,6 y 4 mm. Para el árido fino de 2 y 0,5 mm.

Una vez colocados los distintos tamices, se enciende la tamizadora y se vuelca en la parte superior la mezcla de áridos. Se deja durante aproximadamente 1 min mientras visualmente se va comprobando que no se acumulen en las esquinas de la tamizadora una gran parte del material. Una vez realizado este trabajo ya se cuenta con distintos tamaños de árido que se recogen en sus respectivos capazos.



Figura 3.21. Tamizadora y capazos con distintos tamaños de árido.

La tamizadora vibratoria tiene algunos inconvenientes, como por ejemplo con el árido retenido en el tamiz 0,063 mm. Al ser un tamiz tan fino, no se puede considerar que el material esté tamizado completamente. Por ello, se necesita realizar otro tipo de tamizado para estas fracciones. Se coloca en un tamiz y se va limpiando poco a poco con agua. De esta manera el agua arrastra las partículas más finas que se pasan por el tamiz 0,063 mm.



Figura 3.22. Tamizado árido retenido en el tamiz 0,063mm

- Pesado de áridos y filler

Una vez clasificados los áridos para los distintos tamaños, se preparan unas bandejas metálicas con las diferentes cantidades de cada muestra. Para ello se colocan la bandeja en la báscula y se va añadiendo la cantidad exacta de cada material.



Figura 3.23. Pesado de áridos.

El filler se pesa por separado en unos vasos de plástico.



Figura 3.24. Filler.

- Secado y calentamiento del árido

Para trabajar con los áridos es necesario que estén completamente secos. Para ello se colocan las bandejas con la cantidad necesaria de áridos para fabricar una probeta en una estufa hermética a 160°C durante un mínimo de 4 horas.

3.5. Fabricación

Una vez el árido esté seco, como se ha comentado en el apartado anterior, se coloca el betún en una estufa a 160°C dos horas antes de empezar la fabricación de la mezcla. Hay que controlar este tiempo porque si el betún está más de 4h en la estufa puede sufrir un proceso de envejecimiento.

Seguidamente, se recortan unos papeles con la misma forma cilíndrica y tamaño que la probeta, dos por cada probeta. Estos recortes de papel se colocan uno en la base de la probeta antes de verter la mezcla y el otro en la parte superior una vez se ha vertido la mezcla.

Antes de iniciar el mezclado se debe contar con todos los utensilios calientes, al igual que una plancha sobre la que se hará la tarea de mezclado. Entonces se retira una de las bandejas con los áridos (pesados para fabricar una probeta) y se vierten en un recipiente metálico con forma de olla, donde se hace la mezcla de áridos, filler y betún. El recipiente se tara en la báscula, así se podrá controlar la cantidad exacta de betún a añadir en cada probeta, y se ubica sobre la plancha, donde se mezclan todos los materiales, primero áridos y betún; después se añade el filler y se vuelve a mezclar bien para homogeneizar toda la muestra, controlando que el betún envuelva y cree una película alrededor de todos los materiales y manteniendo la temperatura entre los 155 y 160°C.

Entonces se vierte la mezcla en unos moldes cilíndricos, donde ya se ha colocado el papel previamente recortado en la base inferior y después del vertido se coloca el papel en la base superior.



Figura 3.25. Proceso de fabricación de una probeta (de izquierda a derecha).

Seguidamente, perdiendo el mínimo tiempo posible, para no perder la temperatura de la muestra, se coloca en la compactadora Marshall dónde se compacta como indica la normativa UNE-EN 12697-30. El procedimiento es de 75 golpes en una cara, se da vuelta y se compacta por la otra cara con 75 golpes.



Figura 3.26. Compactadora Marshall.

Para terminar se enumeran las probetas para poder diferenciar las distintas series, se dejan enfriar y al cabo de 24 horas se procede a desmoldarlas con un gato hidráulico. Una vez desmoldadas se vuelven a enumerar.



Figura 3.27. Gato hidráulico y probetas Marshall fabricadas.

3.6. Densidad y contenido de huecos

Primero de todo se miden las alturas de las probetas con un pie de rey analógico, se miden 3 puntos equidistantes, por lo que están separadas por un ángulo de 60°. A continuación se pesan con la misma báscula. El diámetro de las probetas está definido por el molde de fabricación y es de 101,6 mm (diámetro convencional de una probeta Marshall).

A continuación se determina la masa de la probeta sumergida, para ello se ponen las probetas en un recipiente con agua, las probetas se sitúan encima de una malla en la base interior del recipiente para asegurarnos que hay contacto directo del agua con todas las caras de las probetas. Se dejan una hora sumergidas antes de pesarlas. El paso siguiente consiste en colocar las probetas en una plataforma sumergida en agua y enganchada en la báscula, de modo que así se pesa la probeta sumergida. Finalmente, se retira del baño y se le pasa un trapo húmedo por todas sus caras, para conseguir la condición de saturación con superficie seca y se vuelve a pesar.

Mediante la siguiente ecuación se puede calcular la densidad aparente de cada probeta.

$$\rho_{ap} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \cdot \rho_w$$

Donde:

ρ_{ap} : Densidad aparente (g/cm^3)

m_1 : masa probeta seca (g)

m_2 : masa probeta sumergida en agua (g)

m_3 : masa probeta superficie saturada seca (g)

ρ_w : densidad del agua (g/cm^3)

Una vez se obtiene la densidad aparente se calcula la densidad máxima. Para su cálculo se debe realizar un proceso un poco laborioso. Para ello hay que fabricar una mezcla más de cada serie, que se deposita en unas bandejas de metal y se deja enfriar. Una vez frío el material se desgranar todos los áridos manualmente sin poder dejar fragmentos mayores de 3 mm pegados entre sí, condición regida según la Norma UNE-EN 1297-5:2003+A1.



Figura 3.28. Áridos desgranados.

Se separan en dos partes iguales los áridos correctamente desgranados y se colocan en dos picnómetros. Se pesa cada picnómetro con la muestra en el interior, se les añade agua destilada hasta el punto del picnómetro debidamente señalado y se dejan durante 30 minutos en un baño de agua a 25°C. Previamente se han pesado los dos picnómetros vacíos.

Durante estos 30 minutos en que se tiene los picnómetros sumergidos, se conecta una máquina de vacío 15 minutos a cada uno de ellos para extraer el aire que queda atrapado en el interior de la mezcla de agua. Es muy conveniente que durante el baño cada 3 o 4 minutos se agiten los picnómetros para ayudar a la extracción de aire.

Transcurridos los 30 minutos del baño, se rellenan con agua destilada los picnómetros hasta la marca indicada en ellos, sólo si se ha perdido agua durante la agitación y el movimiento de los picnómetros. Se comprueba que no queden gotas de agua en la

parte que debe estar perfectamente seca y si no es así se secan debidamente. Por último se vuelen a pesar.

A lo largo del proceso se van registrando los pesos del picnómetro para finalmente calcular la densidad máxima con la siguiente expresión.

$$\rho_{max} = \frac{m_2 - m_1}{V_p - \left(\frac{m_3 - m_2}{\rho_w} \right)}$$

Donde:

ρ_{max} : densidad máxima (g/cm³)

m_1 : masa del picnómetro (g)

m_2 : masa del picnómetro y la muestra de la mezcla (g)

m_3 : masa del picnómetro, la muestra de la mezcla y agua destilada (g)

V_p : volumen del picnómetro (cm³)

ρ_w : densidad del agua (g/cm³)

Por último, con los datos de densidad aparente y la densidad máxima se puede calcular el contenido de huecos (H%) mediante la siguiente fórmula.

$$H\% = \frac{\rho_{max} - \rho_{ap}}{\rho_{max}} \cdot 100$$

3.7. Ensayo Fénix

3.7.1. Introducción y descripción

Este ensayo desarrollado recientemente en la Universidad Politécnica de Cataluña, dentro del marco del Proyecto CENIT: Investigación Estratégica de Carreteras más Seguras y Sostenibles, Acrónimo: FÉNIX, se realiza a tracción, sobre probetas o testigos semicilíndricos con una muesca en el centro que propicia la creación de la fisura. Analiza y determina el comportamiento de las mezclas bituminosas frente a los fenómenos de fisuración.

En el ensayo Fénix se trabaja con las probetas cilíndricas debidamente cortadas por la mitad en la cual se les realiza una fisura de 6mm de profundidad en la parte central de

las mismas. Se realiza siempre a tracción con una velocidad de 1 mm/min y a la temperatura elegida en cada caso.

Los parámetros registrados durante el ensayo son la carga y el desplazamiento, a partir de los cuales se puede graficar la figura 3.13.

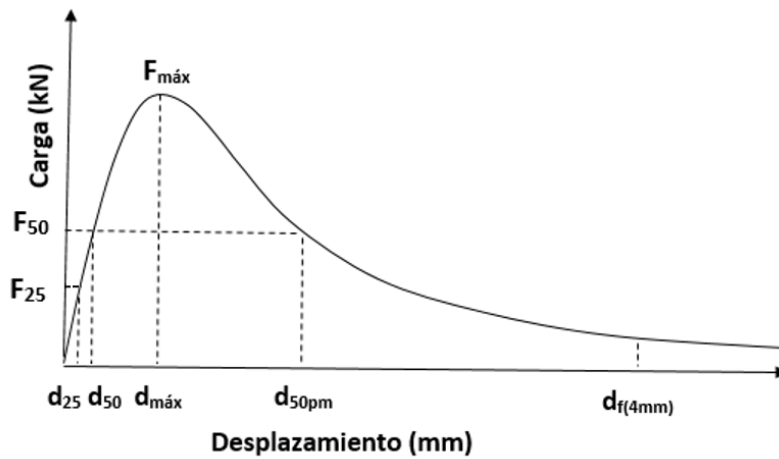


Figura 3.29. Gráfica Carga-Desplazamiento ensayo Fénix.

Se termina el ensayo cuando la fuerza transmitida es igual o menor a 5KN o cuando el desplazamiento es mayor que 4 mm.

Las diferentes propiedades y parámetros que se analizan se describen a continuación:

- ◆ F_{\max} : Carga máxima a tracción (kN).
- ◆ ΔF_{\max} : Desplazamiento a Carga máxima. Es el desplazamiento que sufre el pistón al someterse al ensayo (mm).
- ◆ R_T : Resistencia a carga máxima. Es la relación entre la carga máxima y el área de fractura (MPa).

$$R_T = \frac{1000 \cdot F_{\max}}{h \cdot l}$$

Donde:

R_T : resistencia a tracción (MPa)

F_{\max} : carga máxima a tracción (kN)

h : espesor de la probeta (m)

l : longitud inicial del radio reducido (m)

- ♦ G_F : energía de fractura. Es el trabajo disipado durante el proceso de fisuración entre el área de fractura perpendicular a la fuerza aplicada (J/m²).

$$G_F = \frac{W_D}{h \cdot l}$$

Donde:

G_F : energía de fractura (J/m²)

W_D : trabajo realizado durante el proceso de fisuración (kN.mm)

h : espesor de la probeta (m)

l : longitud inicial del radio reducido (m)

- ♦ $d_{0,5}$ PM: Desplazamiento al 50% F_{max} postpico. Es el registro por la mezcla una vez el valor de la carga ha disminuido al 50% de la carga máxima. Es el parámetro principal para poder obtener la deformación sufrida, (mm).
- ♦ I_T : índice de tenacidad. Siendo la energía disipada durante el proceso de ablandamiento multiplicado por un factor de fragilidad. Este factor corresponde con el desplazamiento realizado desde el punto donde la carga es máxima hasta el punto en que la carga es la mitad de la carga máxima. El índice de tenacidad se hace para evaluar la tenacidad de la muestra.

$$I_T = \frac{W_D - W_{F_{max}}}{h \cdot l} \cdot (d_{0,5} \text{ PM} - \Delta F_{max})$$

Donde:

I_T : índice de tenacidad (J.mm/m²)

W_D : trabajo realizado durante el proceso de fisuración (kN.mm)

$W_{F_{max}}$: trabajo realizado hasta la carga máxima (kN.mm)

h : espesor de la probeta (m)

l : longitud inicial del radio reducido (m)

$d_{0,5}$ PM: Desplazamiento al 50% F_{max} postpico (mm)

ΔF_{max} : Desplazamiento hasta el punto de carga máxima (mm)

IRT: índice de rigidez a tracción. Es la relación entre el valor medio de la carga máxima y el desplazamiento a ese valor de carga antes de la carga máxima. (MPa/mm).

$$IRT = \frac{F_{50} - F_{25}}{d_{50} - d_{25}} \cdot \frac{1000}{h \cdot l}$$

Donde:

IRT: índice de rigidez a tracción (MPa/mm)

F_{max} : carga máxima a tracción (kN)

Δ_m : desplazamiento antes de la carga máxima a la mitad de F_{max} (mm)

h: espesor de la probeta (m)

l: longitud inicial del radio reducido (m)

3.7.2. Procedimiento del ensayo Fénix

Una vez se tienen todas las probetas fabricadas, se cortan por la mitad y se hace una ranura de unos 6 mm en la cara plana. Para asegurar que durante la realización del corte no se han producido errores, se miden con un pie de rey las distancias desde el centro hasta el extremo, de esta manera se obtiene la longitud de la ranura exacta.



Figura 3.30. Probeta Fénix.

A continuación se procede a limpiar las placas, en las cuales se pegarán las probetas para asegurar que no haya suciedad en ellas y tengan una buena adherencia. Para limpiarlas se lijan con un papel de vidrio y se limpian con un trapo y disolvente.

Seguidamente se prepara la resina para pegar las probetas a las placas. Se prepara una mezcla de resina y retardador, con una proporción de 3 partes de resina por 1 parte de retardador. El retardador es imprescindible para que haya tiempo de aplicar la mezcla a todas las probetas antes de que endurezca el producto.



Figura 3.31. Resina y retardador.

Para pegar las probetas se usan unas placas rectangulares que sirven como soporte para que las probetas queden bien alineadas, sin la posibilidad de torceduras o de un espacio excesivo o desigual entre las placas. Cuando están todas las placas preparadas y en su posición, se unta con resina la cara plana de las probetas y se pegan encima de las placas hasta que se sequen. Se escribe la identificación de cada probeta encima de la placa.

Se dejan secar durante 48 horas, las primeras 24 horas a temperatura ambiente y las siguientes 24 horas en la nevera para que se enfríen hasta la temperatura correspondiente del ensayo, en este caso se dividen en dos y se identifican: las caras A de cada probeta se ensayan a 20 °C y las caras B, a 5 °C.



Figura 3.32. Probetas pegadas en las placas debidamente alineadas.

Para la realización del ensayo hay que acondicionar la cámara a la misma temperatura a la que se han enfriado las probetas, a 20 °C o a 5 °C. Se fijan las probetas a los soportes de la prensa en posición vertical, permitiendo un movimiento de rotación en los extremos de las placas. Cuando las placas están colocadas se someten las probetas a un esfuerzo a tracción de 5 kN, para acabar de ajustar perfectamente a la máquina. Se cierra la cámara y se espera a que se recupere la temperatura de ensayo. Entonces se somete la probeta a un esfuerzo a tracción a una velocidad de desplazamiento constante de 1 mm/min.

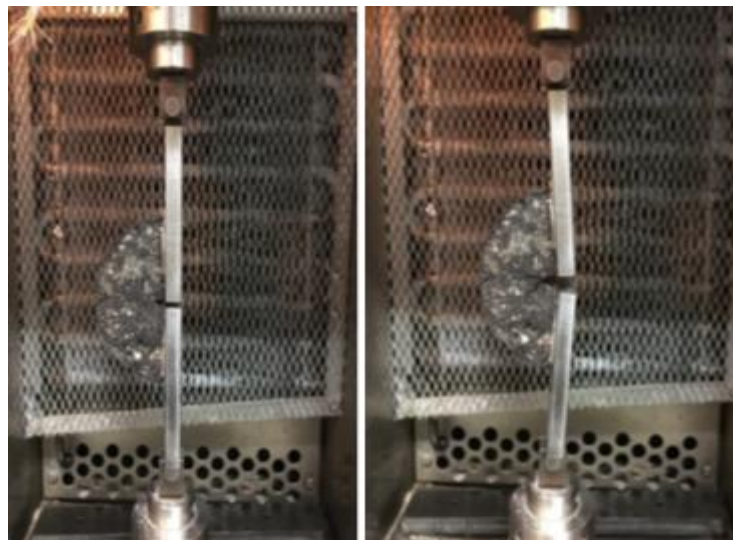


Figura 3.33. Rotura de la probeta en el ensayo Fénix.

Se finaliza en ensayo al alcanzar una carga mínima de 5 kN o bien una deformación de 4 mm. Durante el ensayo el equipo va registrando los datos de carga y desplazamiento, con los que se realizan posteriormente los cálculos de los parámetros y el estudio de sensibilidad completo.



Figura 3.34. Probeta antes y después de ser ensayada.

Cuando el ensayo ha finalizado, se retiran las probetas rotas de la prensa, se colocan encima de la plancha calefactora para poder despegarlas de las placas con mayor facilidad. Se limpian las placas para poder ensayar otra serie y se descartan las probetas ya ensayadas.

3.7.3. Procesamiento de datos

Se procesan los datos extraídos de la prensa con una hoja de cálculo (en este caso, se ha usado una plantilla de Excel), proporcionada por el grupo de investigación del Laboratorio de Caminos de la UPC.

La plantilla permite calcular: RT, IRT, IT, $d_{0,5Pm}$ y GF, así como graficar la curva carga-desplazamiento y resumir todos los parámetros medidos y calculados para cada probeta.

Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. AC16S 4,75%										
Probeta	Área de fractura Af (mm ²)	Carga Máxima Fmax (KN)	Resistencia a Tracción RT (Mpa)	Desplazamiento a Fmax DFmax (mm)	Desplazamiento de Rotura DR (mm)	Índice Rigidez a Tracción (25-50) IRT (KN/mm)	Energía de Fractura GF (J/m ²)	Índice de Tenacidad IT (mN)	Desplazamiento al 50% carga postpico $d_{0,5Pm}$ (mm)	$d_{0,5Pm}-d_{Pmax}$ DT (mm)
9B	2527	2,51	1,01	0,29	3,54	11,88	788	194	0,58	0,29
10B	2579	2,45	0,97	0,27	2,68	11,71	553	100	0,49	0,22
11B	2530	2,57	1,04	0,28	3,32	14,10	758	187	0,57	0,29
12B	2564	2,54	1,01	0,31	4,07	13,64	874	258	0,65	0,34
Promedio	2550	2,52	1,01	0,29	3,40	12,83	743	185	0,57	0,29

Tabla 3.4. Datos procesados para AC16S a 5 °C y 5,75% de porcentaje de betún.

CAPÍTULO 4. TEST ESTADÍSTICOS

A continuación, se describen las pruebas estadísticas realizadas sobre el conjunto de resultados obtenidos. Si bien en este capítulo se detallan las ecuaciones que se emplean para cada análisis en el estudio se ha usado un programa informático comercial.

4.1. Test de Grubbs'

Este test se utiliza para encontrar los valores atípicos de una muestra. Puesto que la presencia de un valor anómalo es capaz de alterar el resultado final de un estudio, es preciso detectarlo y eliminarlo.

Este test define dos hipótesis para detectar los elementos residuales:

H_0 : No hay valores atípicos registrados

H_a : Hay exactamente un valor atípico registrado

El test estadístico se basa en la fórmula:

$$G = \frac{\max |Y_i - \widehat{YI}|}{s}$$

La región crítica de este contraste se puede obtener aproximadamente tomando como referencia la distribución t_{n-2} de Student con (n-2) grados de libertad. Se aceptará la hipótesis alternativa H_a de existencia de un dato atípico cuando G sea mayor que el valor crítico.

4.2. Descripción estadística

La descripción estadística es un resumen de distintos parámetros: la media, la desviación estándar, el coeficiente de variación y los intervalos de confianza.

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
4%	14	0.22631	0.02116	(0.21385, 0.23878)
4,75%	14	0.22841	0.02295	(0.21595, 0.24088)
5,5%	14	0.27365	0.02492	(0.26118, 0.28612)
Desv.Est. agrupada = 0.0230599				

Tabla 4.2. Media, Dest. Est., IC (95%)

4.3. Límite de repetibilidad

Se entiende por repetibilidad la proximidad de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mesurando, bajo las mismas condiciones de medición, que incluyen el mismo procedimiento de medición, el mismo observador, el mismo instrumento de medición, utilizado en iguales condiciones, el mismo lugar y con repetición en un corto periodo de tiempo.

El límite de repetibilidad r se calcula como se indica:

$$r = \sqrt{2} \cdot t \cdot s_r$$

Donde:

El factor $\sqrt{2}$ refleja la diferencia entre dos mediciones, t es la t de Student para un determinado número de grados de libertad y s_r es la desviación típica de la repetibilidad (en este caso será la desviación estándar del grupo analizado).

Para un número relativamente grande de grados de libertad y para un nivel de confianza del 95%, se utiliza $t=2$, por lo que el límite de repetibilidad se suele aproximar a:

$$r = 2,8 s_r$$

Tanto la desviación como el límite de repetibilidad se pueden expresar en valores absolutos como en porcentaje de la media.

4.4. Test de Normalidad (Kolmogorov-Smirnov)

En estadística, la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S) también denominado test de normalidad, es un test no paramétrico que determina el ajuste de dos distribuciones de probabilidad entre sí. Se basa en la siguiente ecuación:

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & \text{si } y_i \leq x, \\ 0 & \text{alternativa.} \end{cases}$$

Para dos colas el estadístico viene dado por:

$$D_n^+ = \max(F_n(x) - F(x))$$

$$D_n^- = \max(F(x) - F_n(x))$$

Donde:

$F(x)$: Distribución presentada como hipótesis.

El test de Normalidad es un paso previo al análisis de varianzas.

4.5. Test de Bartlett

Una vez se sabe si la distribución de la muestra es normal o no, el paso siguiente consiste en evaluar si las varianzas son similares.

La prueba Bartlett se utiliza para probar si k muestras provienen de poblaciones con la misma varianza (homocedasticidad u homogeneidad de varianzas).

La prueba de Bartlett es sensible a las desviaciones de la normalidad. Si las distribuciones no son normales, entonces se puede realizar la Prueba de Levene o la prueba Brown-Forsythe, que son menos sensibles a las desviaciones de la normalidad.

La prueba de Bartlett se utiliza para probar la hipótesis nula, H_0 , que todas las varianzas de una población k son iguales, frente a la hipótesis alternativa de que al menos dos son diferentes. {10}

Si hay k muestras con tamaño n_i y varianzas de las muestras S_i^2 , entonces estadístico de prueba de Bartlett es:

$$X^2 = \frac{(N - k) \ln(S_p^2) - \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \ln(S_i^2)}{1 + \frac{1}{3(k-1)} \left(\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{n_i - 1} \right) - \frac{1}{N - k} \right)}$$

Dónde N y S_p^2 es la estimación combinada de la varianza.

$$N = \sum_{i=1}^k n_i$$

$$S_p^2 = \frac{1}{N - k} \sum_i (n_i - 1) S_i^2$$

La estadística de prueba tiene aproximadamente una distribución χ^2_{k-1} . La hipótesis nula se rechaza si $\chi^2_{k-1, \alpha}$ (este último es el valor crítico de la cola superior de χ^2_{k-1}).

4.6. Test de Levene

El test de Levene, también denominado test de varianzas iguales, es una prueba estadística que evalúa la igualdad de las varianzas para una variable calculada para dos o más grupos. Éste pone en duda la hipótesis nula de que las varianzas poblacionales son iguales. Si el p-valor resultante del test es inferior a un cierto nivel de significación ($\alpha=0,05$), es poco probable que las diferencias obtenidas en las variaciones de la muestra se hayan producido sobre la base de un muestreo aleatorio de una población con varianzas iguales. Por lo tanto, la hipótesis nula de igualdad de varianzas es rechazada y se llega a la conclusión que hay una diferencia entre las variaciones de la población.

El estadístico del test es:

$$W = \frac{(N - k)}{(k - 1)} \frac{\sum_{i=1}^k N_i (Z_{i\cdot} - Z_{..})^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} (Z_{ij} - Z_{i\cdot})^2},$$

Donde:

W: resultado de la prueba.

N: número total de casos en todos los grupos.

Ni: número de casos en el grupo i.

k: número de diferentes grupos a los que pertenecen los casos muestreados.

Yij: valor de la variable medida por el jésimo caso del iésimo grupo.

$$Z_{ij} = \begin{cases} |Y_{ij} - \bar{Y}_{i\cdot}|, & \bar{Y}_{i\cdot} \text{ es la media del "i" esimo grupo} \\ |Y_{ij} - \tilde{Y}_{i\cdot}|, & \tilde{Y}_{i\cdot} \text{ es la mediana del "i" esimo grupo} \end{cases}$$

4.7. ANOVA

La prueba ANOVA permite averiguar si una variable tiene una influencia significativa sobre los resultados analizados. Para hacer la prueba ANOVA debe garantizarse la independencia de grupos y la distribución normal de las muestras.

Un análisis de varianza prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales. La hipótesis nula establece que todas las medias de la población son iguales mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente.

El nombre “análisis de varianza” se basa en el enfoque en el cual el procedimiento utiliza las varianzas para determinar si las medias son diferentes. El procedimiento funciona comparando la varianza entre las medias de los grupos y la varianza dentro de los grupos como una manera de determinar si los grupos son parte de una población más grande o poblaciones separadas con características diferentes.

Las expresiones para el cálculo de los elementos intervienen en el ANOVA son los siguientes:

$$\text{Media Global: } \ddot{X} = \frac{\sum_{j=1}^K \cdot \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij}}{n}$$

$$\text{Variación total: } SCT = \sum_{j=1}^K \cdot \sum_{i=1}^{n_j} \cdot (x_{ij} - \ddot{X})^2$$

$$\text{Variación Intra-grupos: } SCD = \sum_{j=1}^K \cdot \sum_{i=1}^{n_j} \cdot (x_{ij} - \ddot{X}_j)^2$$

$$\text{Variación Inter-grupos: } SCE = \sum_{j=1}^k \cdot (\ddot{X}_j - \ddot{X})^2 \cdot n_j$$

Donde:

K = Muestras sobre las que se aplican los tratamientos.

\ddot{X} = Es la media de las muestras.

X_{ij} = El i-ésimo valor de la muestra j-ésima.

N_j = El tamaño de la muestra.

El test estadístico del ANOVA es la razón entre la variación inter-grupos y la variación intra-grupo. Si la hipótesis nula es cierta, el estadístico obtenido el ANOVA tiene una distribución F de Fisher con (k-1, n-k) grados de libertad y es menor que el valor crítico. De lo contrario, se rechaza la hipótesis nula.

Hay una gran cantidad de pruebas post hoc que se pueden utilizar después del ANOVA, que permiten agrupar las muestras comparadas según se han encontrado o no diferencias estadísticamente significativas. Si los datos cumplen la hipótesis de homogeneidad de las varianzas, se puede usar la prueba de Tukey y de lo contrario, la de Games-Howell.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presenta un resumen de todos los parámetros evaluados, Huecos (H%), y los obtenidos del ensayo Fénix: Resistencia (RT), Índice de Rigidez a Tracción (IRT), Energía de Fractura (GF) y Desplazamiento al 50% de la Carga Máxima Postpico ($d_{0,5PM}$), siendo las variables consideradas, el contenido de betún (4%, 4,75% y 5,5%) y la temperatura a la que se ha realizado el ensayo (5°C y 20°C). Seguidamente se muestran los resultados y su comparación con valores límite especificados en el pliego o en la propuesta del ensayo Fénix, junto con un análisis de las pruebas estadísticas realizadas.

Se han propuesto unos criterios para el uso del ensayo Fénix en el diseño de mezclas bituminosas convencionales tipo AC {11}, que se recogen en la tabla 5.1.

Parámetro		Límite propuesto
Huecos (%)		> 4
IRT (MPa/mm)		> 1
G_D (J/m ²)		> 200
$d_{0,5PM}$ (mm)	Admisible	> 0,4
	Recomendable	> 0,8
	Mezclas dúctiles	> 1,0

Tabla 5.1. Criterios de diseño propuestos para las mezclas tipo AC

5.1. Estadística descriptiva

Se presentan en las tablas 5.2 a 5.7 los parámetros analizados, en valores medios. Debajo de cada valor medio puede verse la desviación estándar, el coeficiente de variación y el límite de repetibilidad.

AC16S - 4% 50/70 Temperatura 20°C	Huecos (%)	RT (MPa)	IRT (MPa/mm)	GF (J/m ²)	D0,5pm (mm)
Media	5,42	0,23	1,23	345,24	1,36
Desv. Est.	0,20	0,02	0,24	58,96	0,18
COV	3,75	9,35	19,54	17,08	13,38
Lim. Rep. r	0,57	0,06	0,68	166,76	0,51

Tabla 5.2. Parámetros AC16S 4% a 20 °C.

AC16S - 4% 50/70 Temperatura 5°C	Huecos (%)	RT (MPa)	IRT (MPa/mm)	GF (J/m2)	D0,5pm (mm)
Media	5,42	0,91	4,21	703,07	0,61
Desv. Est.	0,20	0,07	0,60	96,35	0,10
COV	3,75	7,41	14,20	13,70	16,03
Lim. Rep. r	0,57	1,98	1,70	272,52	0,28

Tabla 5.3. Parámetros AC16S 4% a 5 °C.

AC16S – 4,75% 50/70 Temperatura 20°C	Huecos (%)	RT (MPa)	IRT (MPa/mm)	GF (J/m2)	D0,5pm (mm)
Media	4,28	0,23	1,37	369,55	1,46
Desv. Est.	0,57	0,02	0,26	50,06	0,20
COV	13,32	10,05	18,91	13,55	13,34
Lim. Rep. r	1,61	0,06	0,74	141,59	0,57

Tabla 5.4. Parámetros AC16S 4,75% a 20 °C.

AC16S – 4,75% 50/70 Temperatura 5°C	Huecos (%)	RT (MPa)	IRT (MPa/mm)	GF (J/m2)	D0,5pm (mm)
Media	4,42	1,01	4,63	756,76	0,6
Desv. Est.	0,61	0,07	0,22	114,05	0,07
COV	13,9	7,14	4,77	15,07	11,36
Lim. Rep. r	1,73	0,20	0,62	322,58	0,20

Tabla 5.5. Parámetros AC16S 4,75% a 5 °C.

AC16S – 5,5% 50/70 Temperatura 20°C	Huecos (%)	RT (MPa)	IRT (MPa/mm)	GF (J/m2)	D0,5pm (mm)
Media	3,25	0,27	1,64	455,24	1,43
Desv. Est.	0,20	0,02	0,44	39,29	0,17
COV	6,03	9,10	26,66	8,63	11,81
Lim. Rep. r	0,57	0,06	1,24	111,13	0,48

Tabla 5.6. Parámetros AC16S 5,5% a 20 °C.

AC16S – 5,5% 50/70 Temperatura 5°C	Huecos (%)	RT (MPa)	IRT (MPa/mm)	GF (J/m2)	D0,5pm (mm)
Media	3,28	1,05	4,15	889,43	0,69
Desv. Est.	0,19	0,07	0,67	140,10	0,14
COV	5,76	6,95	16,26	15,75	19,81
Lim. Rep. r	0,54	0,20	1,90	396,26	0,40

Tabla 5.7. Parámetros AC16S 5,5% a 5 °C.

Los datos individuales de cada grupo de estudio, así como los resultados de todas las pruebas estadísticas se recogen en los Anejos de este TFG.

5.2. Contenido de huecos

A continuación, se adjunta la figura 5.1 donde se pueden ver los resultados obtenidos, en valores medios con las barras de desviación estándar. Además, se han indicado en la figura, los límites de contenido de huecos mínimo y máximo especificados en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) para una mezcla bituminosa AC16S. Puede verse en el mismo que, para el mayor contenido de betún, la mezcla presenta un porcentaje de huecos inferior al límite mínimo correspondiente a las categorías de tráfico altas y medias (T00 a T2), poniendo en evidencia que este contenido de betún ha cerrado la mezcla en exceso. Los otros dos contenidos de betún se encuentran dentro de los límites para cualquier categoría de tráfico.

Se recuerda que las categorías de tráfico se clasifican en función de la intensidad media diaria de los vehículos pesados (IMDp) prevista en el carril de proyecto en el año de la puesta en servicio de la carretera.

Categoría de tráfico	T00	T0	T1	T2	T31	T32	T41	T42
IMDp	≥ 4000	3999-2000	1999-800	799-200	199-100	99-50	49-25	< 25

Tabla 5.8. Categorías de tráfico pesado

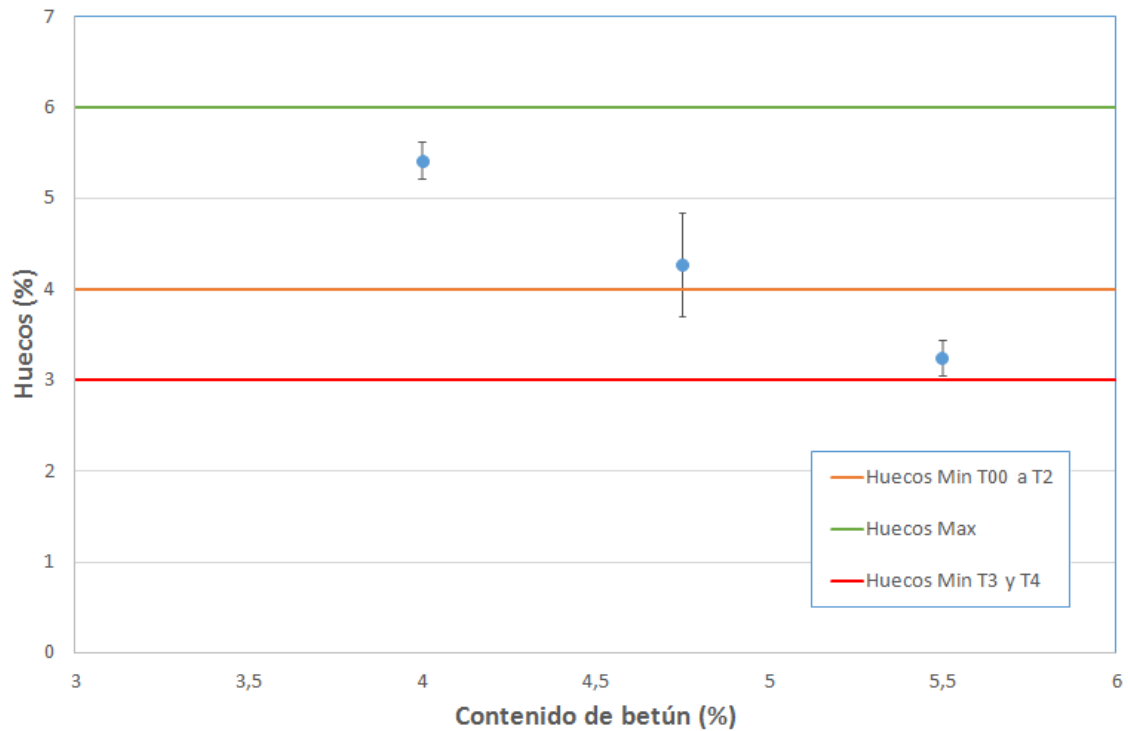


Figura 5.6. Huecos-Contenido de betún

El análisis estadístico revela que los grupos analizados presentan una distribución normal pero que sus varianzas no son similares. Por tanto, después de realizar la prueba ANOVA se ha procedido a hacer el test Games Howell. El análisis revela que los grupos son diferentes entre sí, como lo indica la agrupación obtenida, Tabla 5.8.

Factor	N	Media	Agrupación
4%	14	5.4248	A
4,75%	14	4.280	B
5,5%	14	3.2519	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Tabla 5.9. Agrupación según el contenido de Huecos

5.3. Parámetros del ensayo Fénix

5.3.1. Resistencia a tracción (RT)

Este parámetro se ha calculado a partir de la carga máxima dividida por el área de la sección de rotura.

La resistencia Fénix ha mostrado una tendencia a aumentar con el contenido de betún, como era de esperar, y muy superior a baja temperatura, figura 5.2. A 5°C este

parámetro oscila, en valores medios, entre 0,91 y 1,05 MPa, mientras que a 20°C el rango va de 0,23 a 0,27 MPa. Asimismo, también debe comentarse que a 5°C las dispersiones fueron superiores que a 20°C. A la fecha de este TFG no se ha especificado ni propuesto ningún valor mínimo de resistencia, por lo que sólo se ha evaluado su respuesta en términos de tendencia, pero sin evaluar cuantitativamente los valores obtenidos.

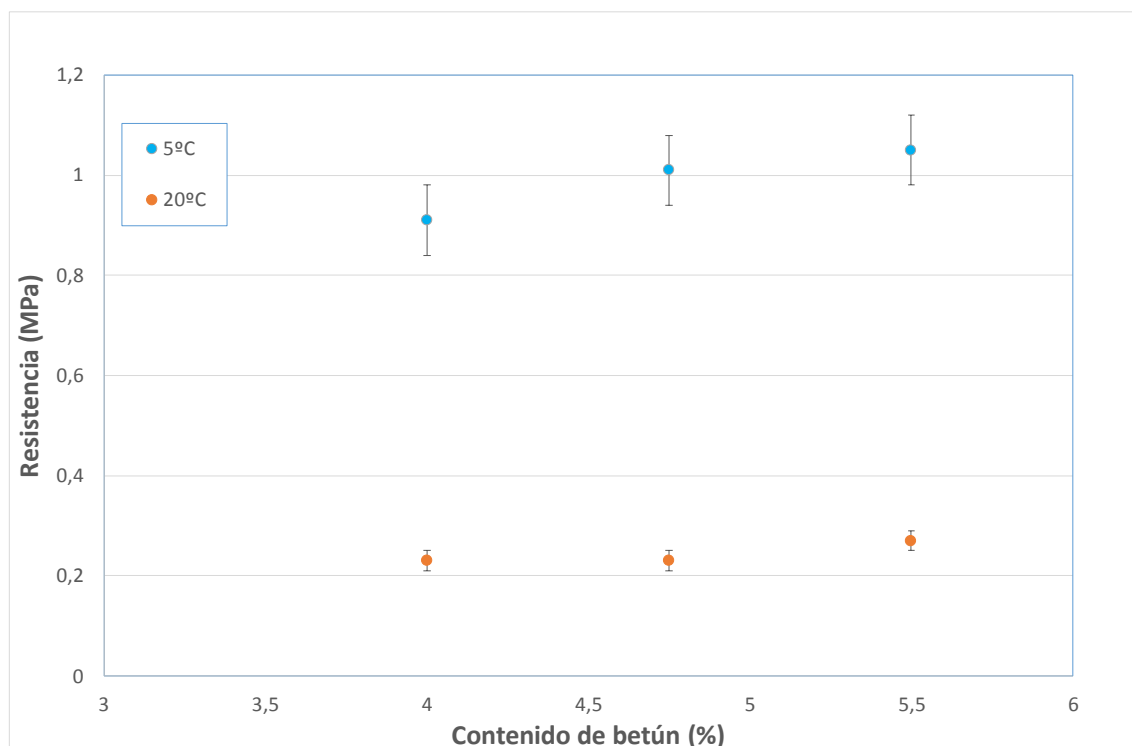


Figura 5.7. Resistencia-Contenido de betún

En cuanto al análisis estadístico, se detalla por temperaturas de ensayo.

◆ 20 °C

Los grupos analizados presentan una distribución cercana a la normal y las varianzas son similares, por lo que después de hacer la prueba ANOVA se ha usado el test de Tukey para agruparlos, Tabla 5.8.

Factor	N	Media	Agrupación
5,5%	14	0.27365	A
4,75%	14	0.22841	B
4%	14	0.22631	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Tabla 5.10. Agrupación según la Resistencia a 20 °C.

Esta agrupación muestra que el grupo con mayor contenido de betún muestra mayor resistencia que los otros dos y que esa diferencia es significativa. Por otro lado, los dos grupos restantes no se diferencian entre sí.

◆ 5 °C

En este caso se realiza el mismo procedimiento, porque las muestras también tienen una distribución normal y las varianzas son similares. Pero ahora es el grupo con menor contenido de betún el que se diferencia del resto por ser su diferencia estadísticamente significativa, Tabla 5.9. Este resultado muestra la importancia del contenido de betún cuando las mezclas bituminosas están sometidas a bajas temperaturas.

Factor	N	Media	Agrupación
5,5%	14	1.0492	A
4,75%	15	1.0054	A
4%	14	0.9068	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Tabla 5.11. Agrupación según la Resistencia a 5 °C.

5.3.2. Índice de rigidez a tracción (IRT)

Se define cómo IRT a la pendiente de la curva carga-desplazamiento entre el 25% y el 50% de la carga máxima. A mayor pendiente, mayor rigidez de la mezcla y viceversa.

La rigidez a tracción del ensayo Fénix ha mostrado una tendencia a aumentar con el contenido de betún en el caso del ensayo realizado a 20°C, pero no a 5°C. Mientras a 20°C, el valor de IRT sube de 1,23 a 1,64 MPa/mm a medida que incrementa el porcentaje de betún, a 5°C el IRT varía entre 4,15 y 4,63 MPa/mm sin mostrar una tendencia definida.

Con respecto al límite propuesto de IRT mínimo de 1 MPa/mm, puede verse que se ha cumplido para todos los grupos analizados, garantizado una rigidez mínima de las mezclas bituminosas cuando están a temperaturas medias.

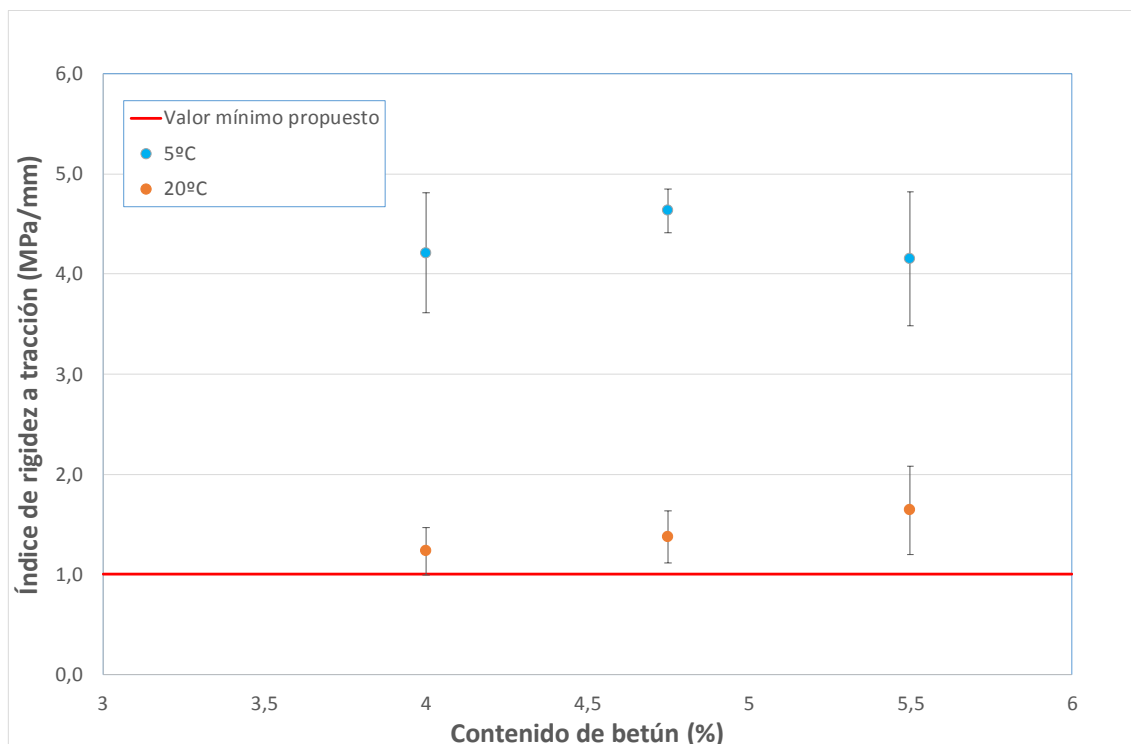


Figura 5.8. Índice de rigidez a tracción-Contenido de betún.

En cuanto al análisis estadístico, se detalla por temperaturas de ensayo.

◆ 20 °C

Los grupos analizados presentan una distribución cercana a la normal y sus varianzas son similares, por lo que después de hacer la prueba ANOVA se ha utilizado el test de Tukey para agruparlos, Tabla 5.10.

Factor	N	Media	Agrupación	
5,5%	14	1.642	A	
4,75%	14	1.3662	A	B
4%	14	1.2318		B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Tabla 5.22. Agrupación según el IRT a 20 °C.

Esta agrupación muestra que hay diferencias significativas entre los grupos con el mayor y el menor contenido de betún (5,5 y 4%). El mayor contenido de betún ha aumentado la rigidez de la mezcla.

◆ 5 °C

Nuevamente se realiza el mismo procedimiento, porque las muestras también tienen una distribución normal y sus varianzas son similares. A esta temperatura no es posible detectar diferencias entre los tres grupos desde el punto de vista estadístico, tal como ya se aprecia en la figura, porque la baja temperatura ha rigidizado excesivamente a las mezclas estudiadas, Tabla 5.11.

Factor	N	Media	Agrupación
4,75%	14	4.6264	A
4%	14	4.214	A
5,5%	14	4.146	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Tabla 5.13. Agrupación según el IRT a 5 °C.

5.3.3. Energía de fractura (GF)

Se define cómo GF al área bajo la curva carga-desplazamiento, cuanto mayor es la energía, mayor resistencia opone la mezcla. Este parámetro aumenta con el contenido de betún, que le otorga mayor resistencia a las mezclas. A 20°C varía de 345 a 455 J/m² y a 5°C va desde 703 a 889 J/m².

Con respecto al límite propuesto de GF mínimo de 200 J/m², todas las mezclas estudiadas superan este requerimiento a ambas temperaturas.

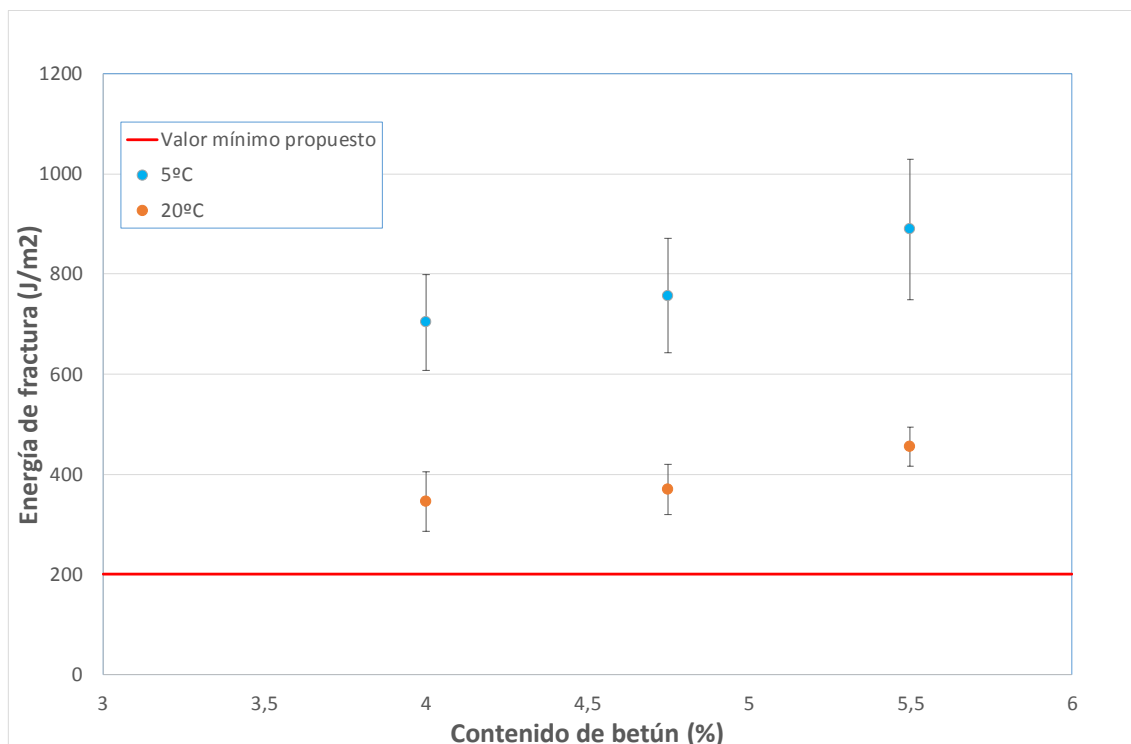


Figura 5.9. Energía de fractura-Contenido de betún.

En cuanto al análisis estadístico, para cada temperatura de ensayo se concluye lo siguiente:

◆ 20 °C

No todos los grupos presentan una distribución normal; sin embargo, sus varianzas son similares, por lo que después de hacer la prueba ANOVA se ha utilizado el test de Tukey para agruparlos, Tabla 5.12.

Factor	N	Media	Agrupación
5,5%	14	455.2	A
4,75%	14	369.6	B
4%	14	345.2	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Tabla 5.14. Agrupación según la GF a 20 °C.

El análisis confirma que el grupo fabricado con el mayor contenido de betún es estadísticamente diferente de los otros dos, siguiendo la misma tendencia que la resistencia RT.

◆ 5 °C

Para estas muestras se ha confirmado la normalidad y semejanza de varianzas, y se ha realizado el test de Tukey. A pesar de la mayor dispersión de resultados también puede confirmarse que las mezclas elaboradas con mayor contenido de betún son diferentes de las otras dos, Tabla 5.13.

Factor	N	Media	Agrupación
5,5%	14	889.4	A
4,75%	15	756.8	B
4%	14	703.1	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Tabla 5.15. Agrupación según la GF a 5 °C.

5.3.4. Desplazamiento del 50% de la carga post-pico (d0,5Pm)

Se define cómo d0,5Pm al desplazamiento registrado por el pistón de la prensa cuando la carga máxima ha descendido hasta la mitad. Este parámetro permite valorar la ductilidad de la mezcla. A mayor d0,5Pm, mayor ductilidad.

A 20°C, el desplazamiento varía desde 1,36 a 1,46 mm, apreciándose el incremento entre los dos primeros contenidos de betún, 4 y 4,75%, si bien se observa una dispersión importante de resultados. A 5°C, el desplazamiento sube de 0,60 y 0,69 mm, haciéndose más notable el efecto de las bajas temperaturas porque no se aprecian diferencias hasta analizar el mayor contenido de betún, 5,5%. Figura 5.5.

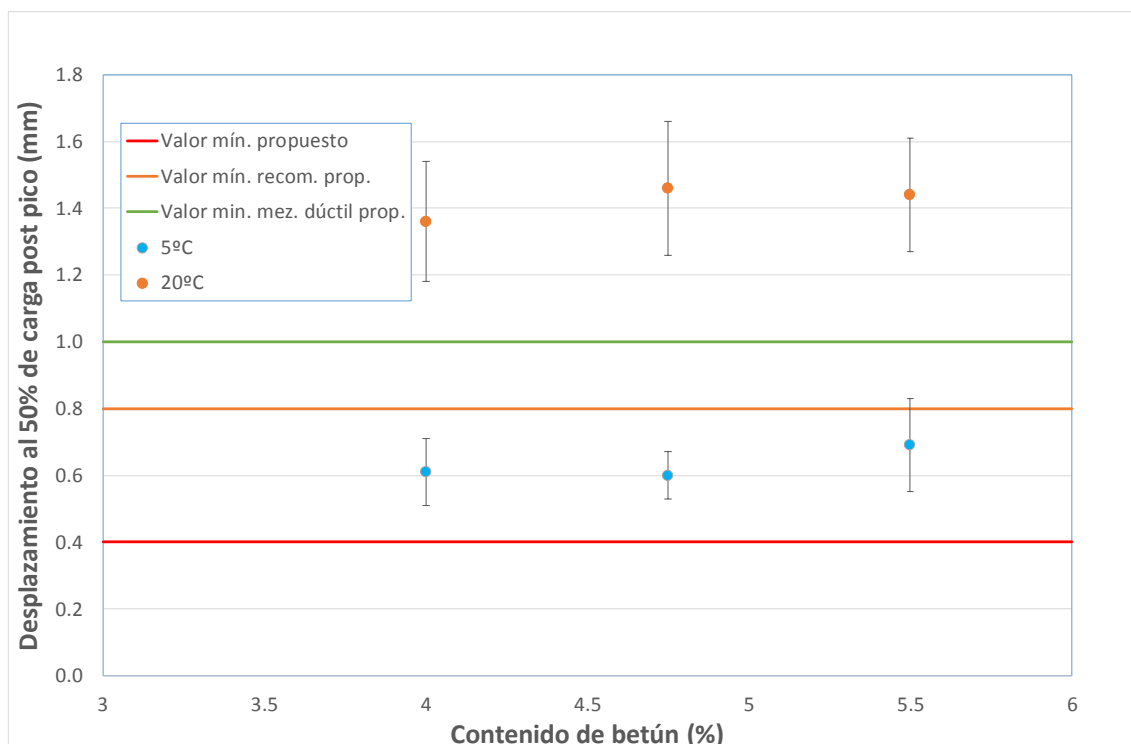


Figura 5.10. Desplazamiento del 50% de la carga post-pico -Contenido de betún.

Con respecto a los límites propuestos para la ductilidad, si bien todos los grupos cumplen con el valor mínimo admisible, de 0,4 mm, sólo a 20°C se superan los límites recomendados, 0,8 mm, y para mezclas dúctiles, de 1 mm.

Con respecto al análisis estadístico, a continuación se analizan los resultados para cada temperatura de ensayo.

♦ 20 °C

Todos los grupos presentan una distribución normal; con sus varianzas semejantes, por lo que después de hacer la prueba ANOVA se ha utilizado el test de Tukey para agruparlos, Tabla 5.14.

Factor	N	Media	Agrupación
4,75%	14	1.4649	A
5,5%	14	1.4358	A
4%	14	1.3581	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Tabla 5.16. Agrupación según el $d_{0,5Pm}$ a 20 °C.

En este caso, pese a la tendencia de aumentar con el contenido de betún, no se han confirmado que los grupos sean estadísticamente diferentes.

◆ 5 °C

Para estas muestras se ha confirmado la normalidad pero no la semejanza de varianzas, por lo que se ha realizado el test de Games-Howell. A pesar del incremento de ductilidad observado con el mayor contenido de betún, el análisis tampoco detecta diferencias significativas a bajas temperaturas, Tabla 5.15.

Factor	N	Media	Agrupación
5,5%	14	0.6897	A
4%	14	0.6130	A
4,75%	15	0.5950	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Tabla 5.17. Agrupación según el $d_{0,5Pm}$ a 5 °C.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

En el siguiente capítulo se presentan las conclusiones obtenidas después de la fabricación de las tres series de probetas con distinto contenido de betún (4%, 4,75% y 5,5%), su posterior ensayo Fénix a dos temperaturas (20°C y 5°C) y después de haber realizado unos test estadísticos para evaluar la sensibilidad del ensayo Fénix.

6.1. Ensayo de densidades y análisis de contenido de huecos

En este caso, el parámetro de la temperatura no afecta al contenido de huecos, por lo que no se ha tenido que discriminar el análisis según la temperatura. El contenido de ligante es determinante en las mezclas AC16S. La primera conclusión, lógica y evidente, es que a mayor cantidad de betún la mezcla presenta un porcentaje de huecos inferior.

La segunda conclusión es que no todos los contenidos de betún responden a los límites especificados en el Pliego PG-3. En este estudio, uno de los contenidos de betún (5,5%) el porcentaje de huecos es inferior al límite mínimo correspondiente a las categorías de tráfico altas y medias (T00 a T2), poniendo en evidencia que este contenido de betún ha cerrado la mezcla en exceso. Por el contrario, los otros dos contenidos de betún se encuentran dentro de los límites para cualquier categoría de tráfico.

6.2. Ensayo Fénix

En este apartado se comentan las conclusiones obtenidas después de analizar la sensibilidad en los parámetros Fénix obtenidos: Resistencia a tracción (RT), Índice de rigidez a tracción (IRT), Energía de fractura (GF) y Desplazamiento al 50% de la carga post-pico (d0,5Pm).

-Resistencia a tracción (RT).

La resistencia a tracción muestra una tendencia a aumentar con el contenido de betún, mostrando el efecto del ligante en las mezclas. También se puede confirmar que la resistencia es muy superior a baja temperatura (5°C) y que a temperatura intermedia (20°C) las dispersiones son inferiores.

Estadísticamente, se ha podido detectar la sensibilidad del ensayo frente a este parámetro, por cuanto se aprecian diferencias significativas a 20°C para el grupo con

mayor contenido de betún (5,5%), que muestra mayor resistencia que los otros dos (4% y 4,75%). Los dos grupos con menos contenido de betún no se diferencian entre sí. A 5°C, el grupo con menos contenido de betún (4%) es el que se diferencia significativamente de los otros dos.

-Índice de rigidez a tracción (IRT)

Cuando se estudia este parámetro la primera conclusión que se obtiene es que el índice de rigidez a tracción tiene una tendencia ascendente con mayor contenido de betún a 20°C, mientras que a 5°C no se muestra una tendencia definida.

A 20°C se aprecia que hay diferencias significativas entre los grupos con mayor contenido de betún y el menor (5,5% y 4%). A mayor contenido de betún ha aumentado la rigidez de la mezcla. Por lo contrario, a 5°C no se detectan diferencias significativas entre los tres grupos estudiados, porque las se han rigidizado excesivamente y la respuesta es muy similar.

Por último, comparando los valores propuestos para el diseño de mezclas tipo AC, puede decirse todos los grupos estudiados superan el límite mínimo propuesto, garantizando una rigidez mínima a estas temperaturas.

- Energía de fractura (GF)

La energía de fractura aumenta con el contenido de betún a ambas temperaturas, poniendo en evidencia el efecto del ligante en la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas.

En el caso de este parámetro, las pruebas estadísticas han demostrado que, tanto a 20°C como a 5°C, el grupo con mayor contenido de betún (5,5%) es diferente de los dos grupos con menor contenido de betún (4,75% y 4%).

Con respecto al límite propuesto de GF mínimo de 200 J/m², todas las mezclas estudiadas superan este requerimiento a ambas temperaturas.

- Desplazamiento del 50% de la carga post-pico (d0,5Pm)

A 20°C se aprecia un incremento de ductilidad al pasar del contenido de betún de 4% a 4,75%. En este caso, pese a la tendencia de aumentar con el contenido de betún, no se han confirmado que los grupos sean estadísticamente diferentes.

A 5°C, en cambio, el aumento de ductilidad se observa al pasar del contenido medio al mayor (4,75 a 5,5%). A pesar del cambio observado tampoco se detectan diferencias significativas entre los tres grupos.

Con respecto a los límites propuestos para la ductilidad, si bien todos los grupos cumplen con el valor mínimo admisible, de 0,4 mm, sólo a 20°C se superan los límites recomendados, de 0,8 mm, y para mezclas dúctiles, de 1 mm.

Sería recomendable analizar mezclas bituminosas con contenidos de betún más diferentes entre sí, como, por ejemplo, de 1% de diferencia entre los grupos (por ejemplo: 4, 5 y 6% de betún), para analizar si las diferencias son estadísticamente significativas.

REFERENCIAS

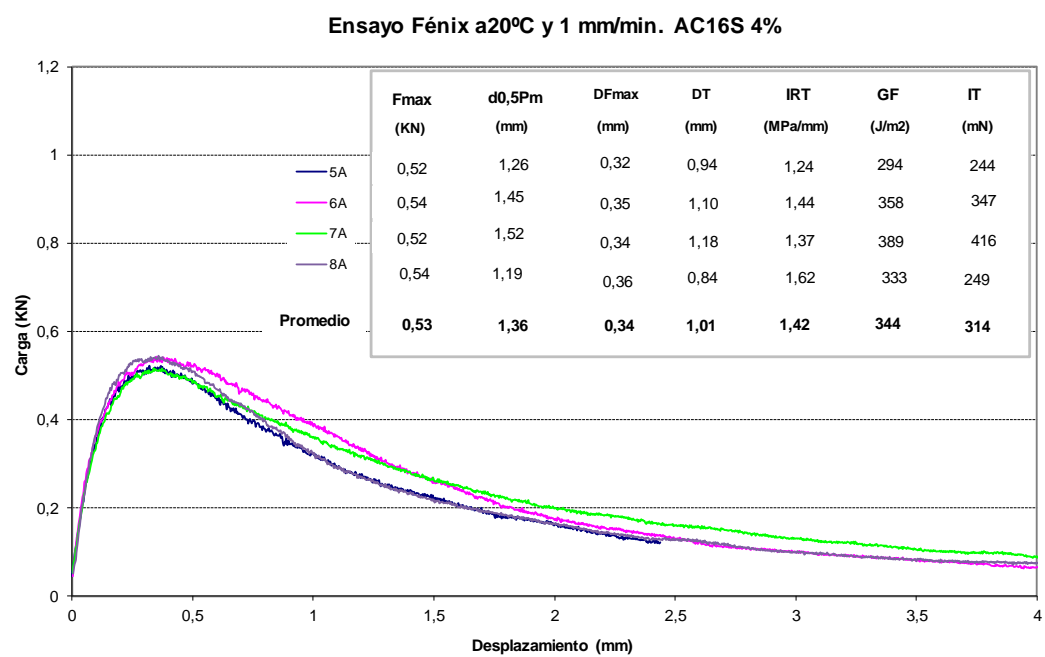
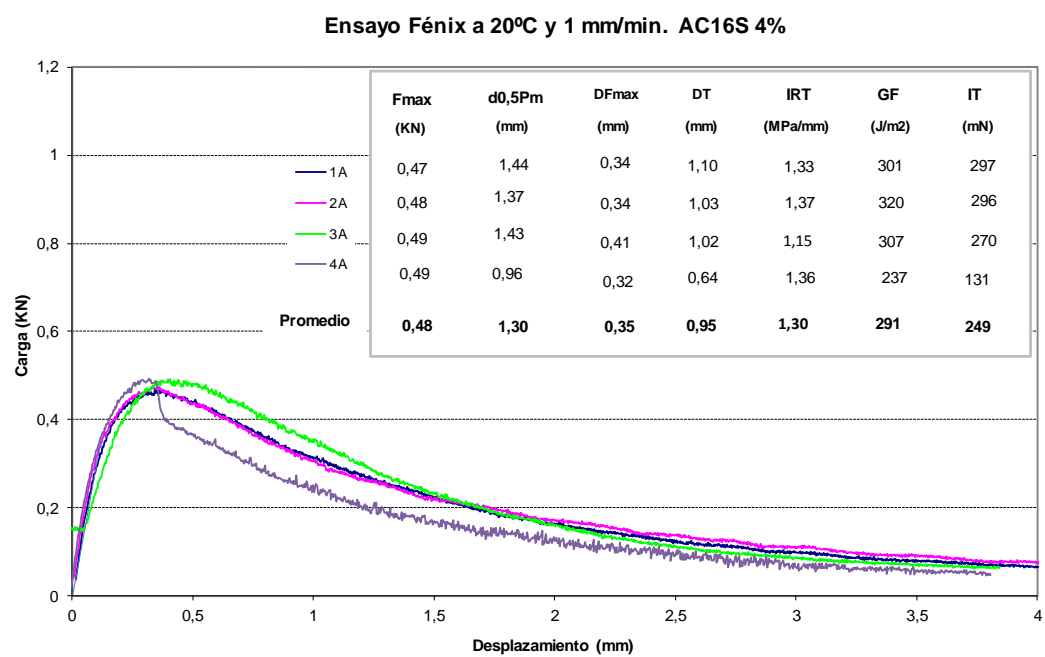
- {1} Boletín Oficial del Estado. Artículo 542.3: tipo y composición de la mezcla. Pliego de prescripciones técnicas general para obras de carreteras y puentes (PG-3). Ministerio de Fomento. (2015).
- {2} Pérez Jiménez, F., Miró, R., Nueva metodología para caracterización de ligantes asfálticos: el método UCL. Revista carreteras, nº 73. Madrid, 1994.
- {3} Turrado Rabanero, P., Universidad Politécnica de Madrid - Análisis de los modelos de deterioro de firmes en la gestión de la conservación de redes de carretera, Tesis doctoral, 2016.
- {4} Gabriel Nsengiyumva, University of Nebraska-Lincoln – Development of Semi-Circular Bending (SCB) Fracture Test for Bituminous Mixtures, Tesis de Master, 2015.
- {5} Andreu Coma, M., Universitat Politècnica de Catalunya - Aplicación del ensayo Fénix al diseño de una mezcla bituminosa semidensa. Efecto del tipo de betún, Trabajo Final de Grado, 2015.
- {6} Pérez, F.; Miró, R. Nuevos ensayos para la caracterización de ligantes y mezclas asfálticas. Carreteras, 2002, no. 122.
- {7} Pérez Jiménez, F., Miró Recasens, R., Fonseca Rodríguez, C., Essai BDT pour la détermination de la tenacité et résistance au fissurage des mélanges bitumineux. Quatrieme Symposium International RILEM, 1997, Lyon, pp. 391-396.
- {8} Bill Buttlar, C., University of Illinois – Disk-Shaped Tension Test, 2015. Disponible en <http://www.dot.state.mn.us/mnroad/projects/Low%20Temperature%20Cracking/PDF%27s%20&%20Images/Task%20Reports/SCB%20vs%20DCT%20Fracture%20Test.pdf>.
- {9} Marcela L., Reyes, O.J., Camacho, H. F. Universidad Militar nueva Granada – Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Diciembre de 2013. Vol. 23-2. Comportamiento de mezclas asfálticas cerradas mediante la aplicación del ensayo Fénix.
- {10} Correa JC., Iral, R., Rojas, L., Universidad Nacional de Colombia – Estudio de potencia de homogeneidad de varianza. Junio 2006, Revista Colombiana de estadística, Volumen 29 N1. Pp 57 a 76.
- {11} Pérez-Jiménez F., Valdés G., Muñoz M., Miró R., Martínez A., Botella R., Amorós J. - Criterios y especificaciones para el uso del ensayo Fénix en el diseño de mezclas bituminosas tipo AC. IX Jornada Nacional ASEFMA 2014. Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA), Madrid, 2014.

ANEJOS

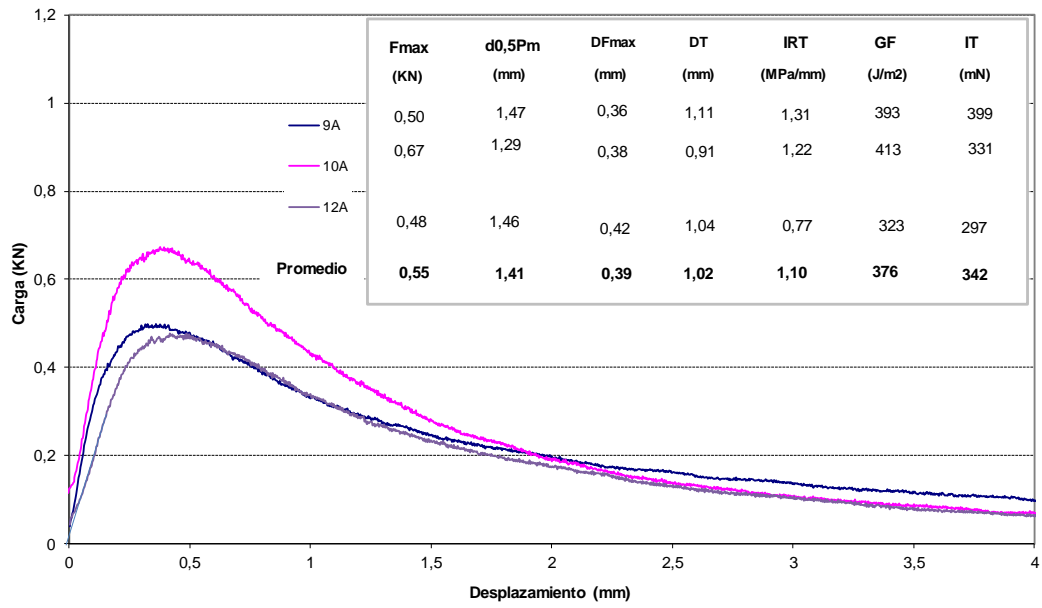
ANEJO 1

RESULTADOS DEL ENSAYO FÉNIX – CURVAS CARGA-DESPLAZAMIENTO

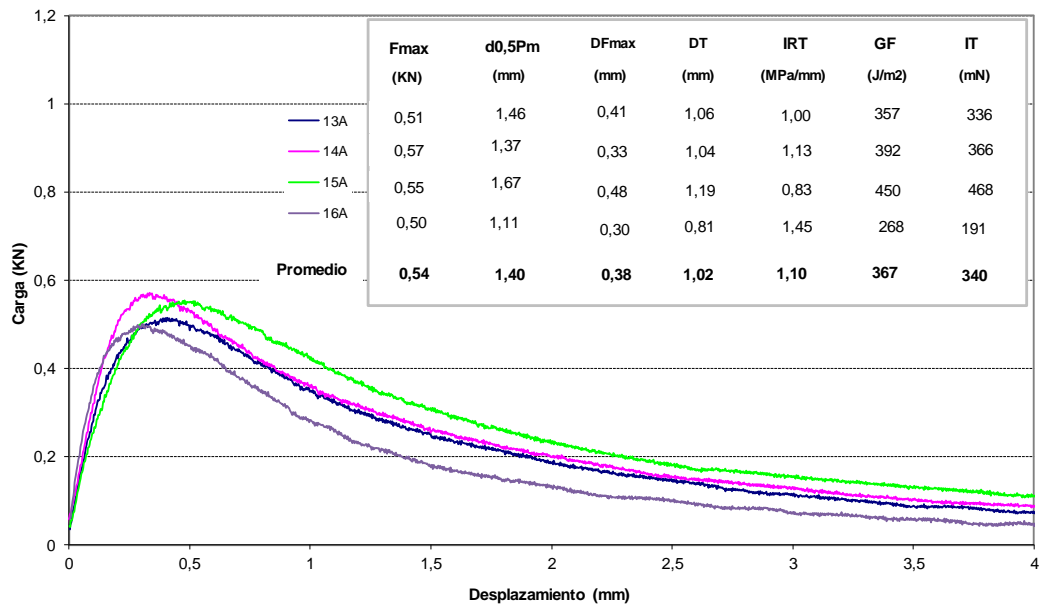
Mezclas con 4% de betún, 20°C



Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. AC16S 4%

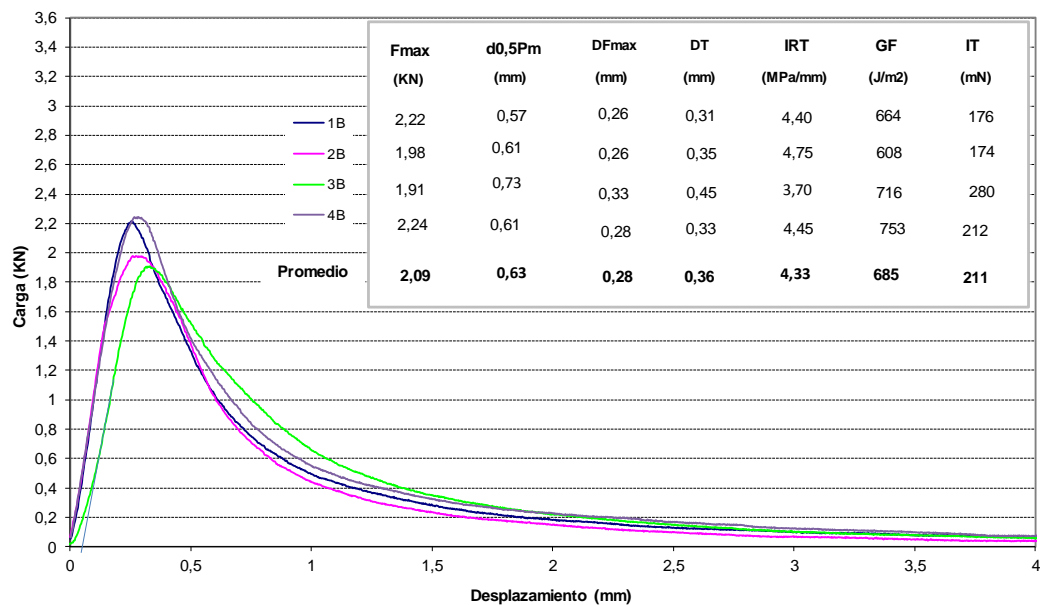


Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. AC16S 4%

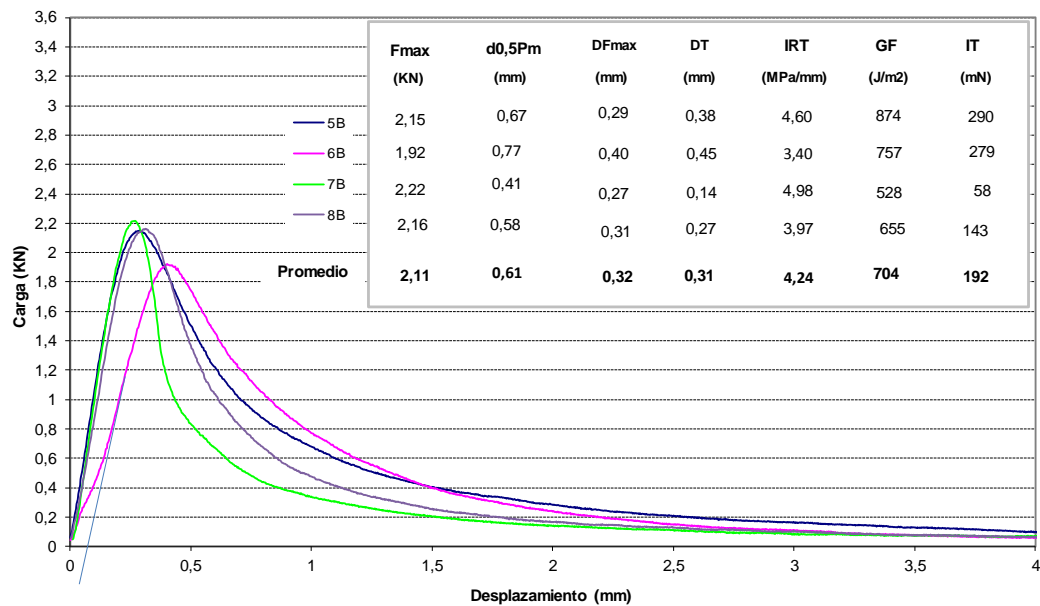


Mezclas con 4% de betún, 5°C

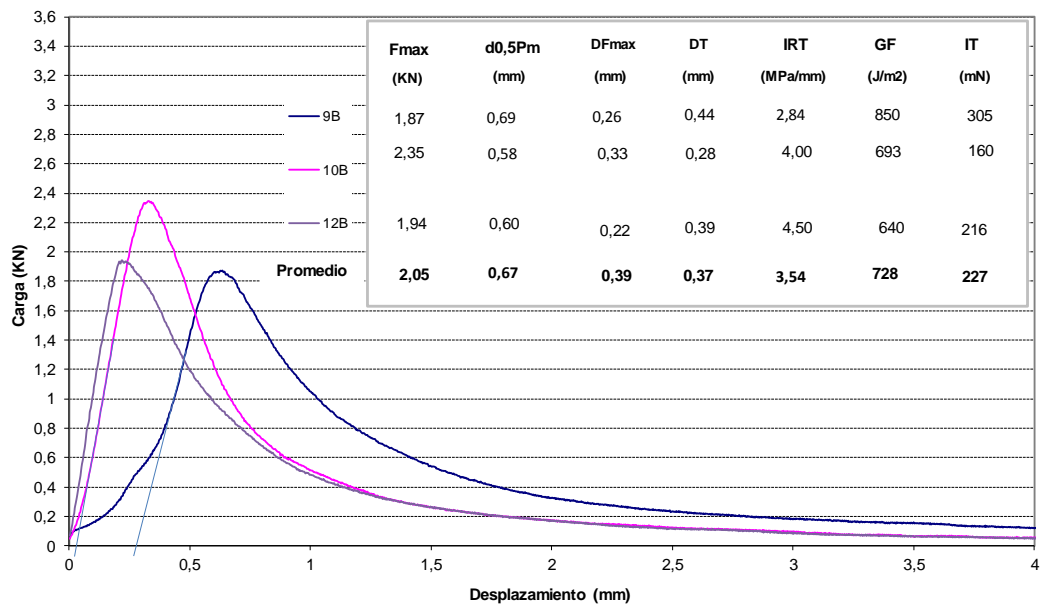
Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. AC16S 4%



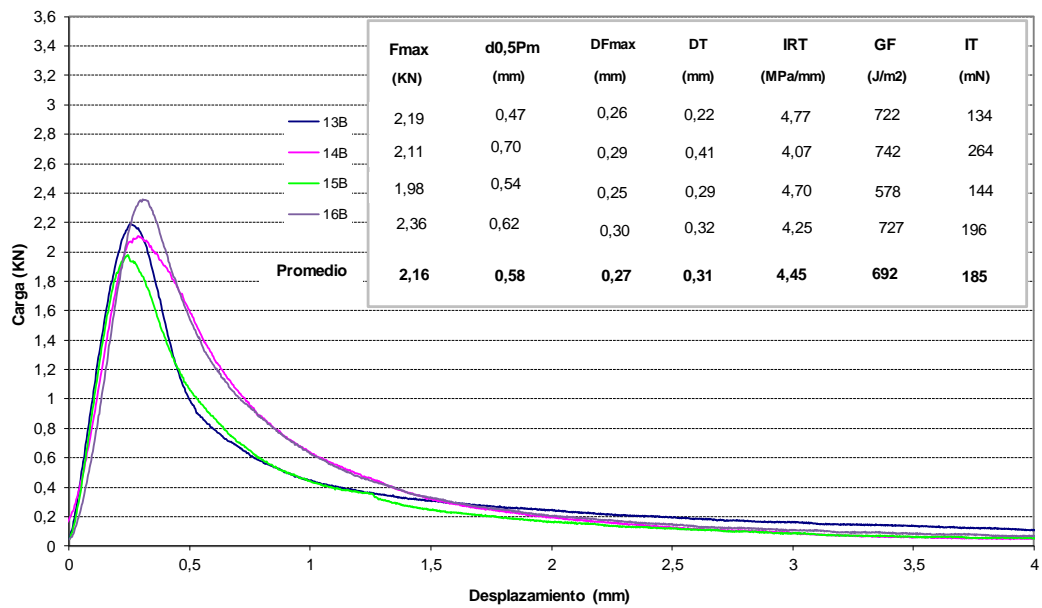
Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. AC16S 4%



Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. AC16S 4%

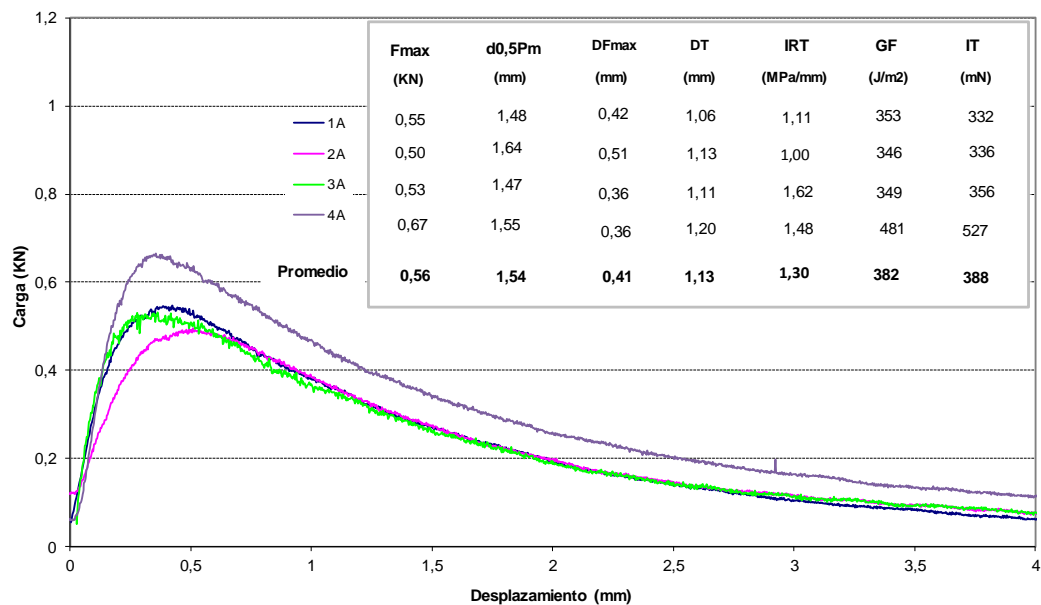


Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. AC16S 4%

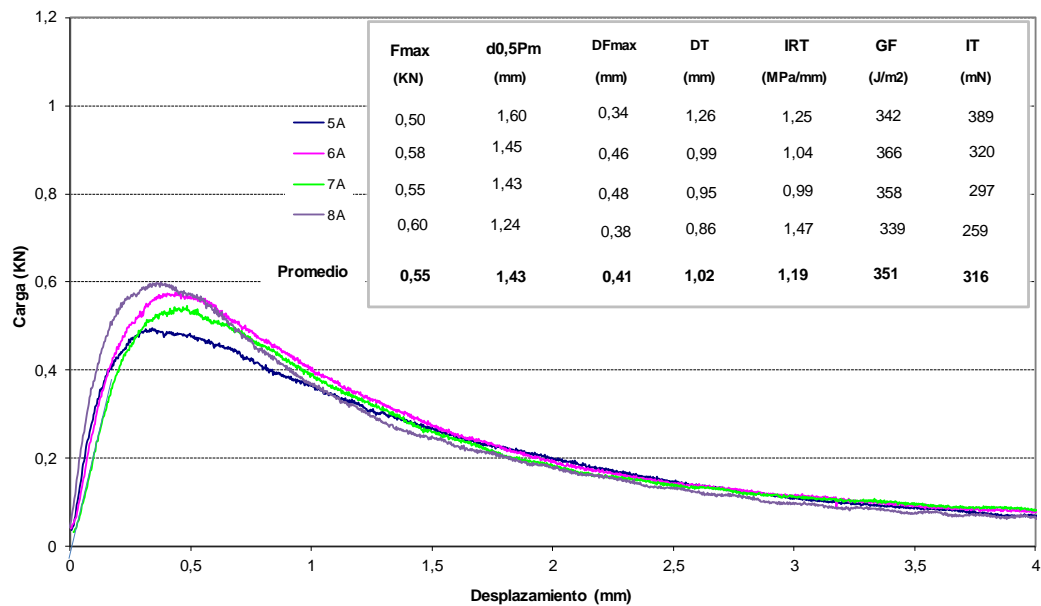


Mezclas con 4,75% de betún, 20°C

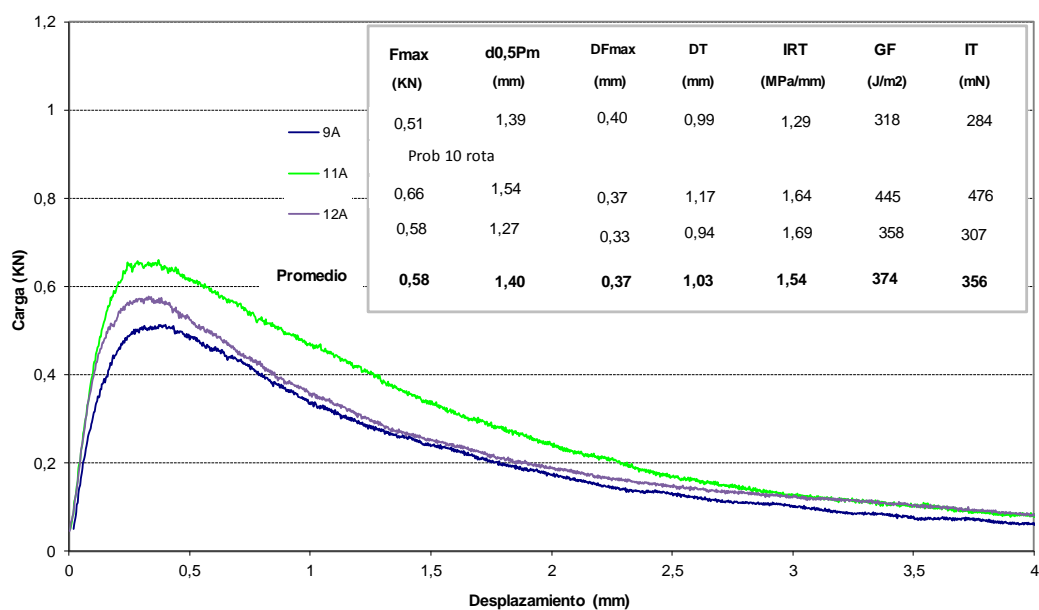
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. AC16S 4,75%



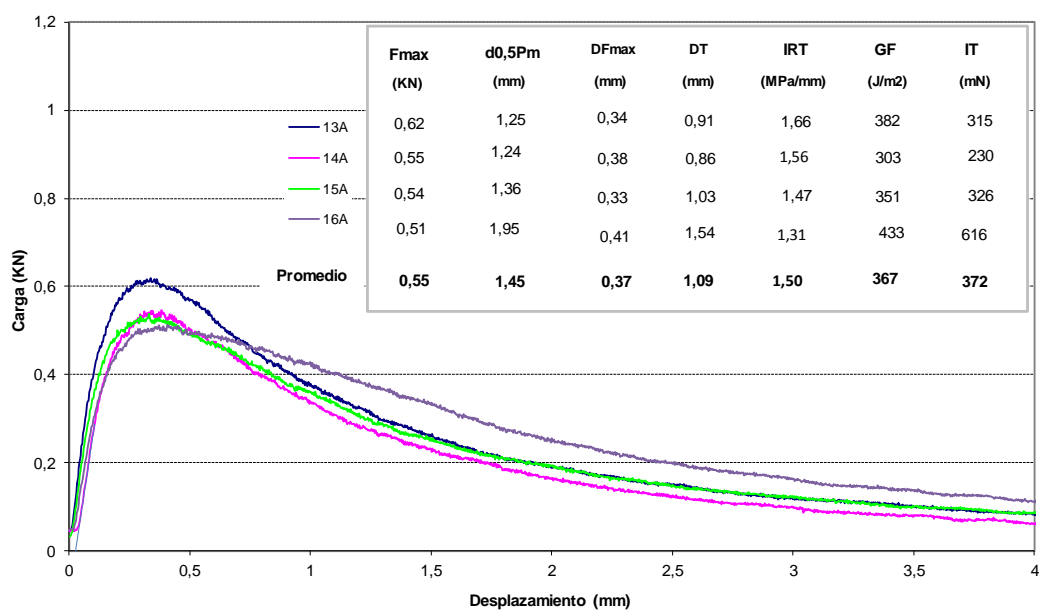
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. AC16S 4,75%



Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. AC16S 4,75%

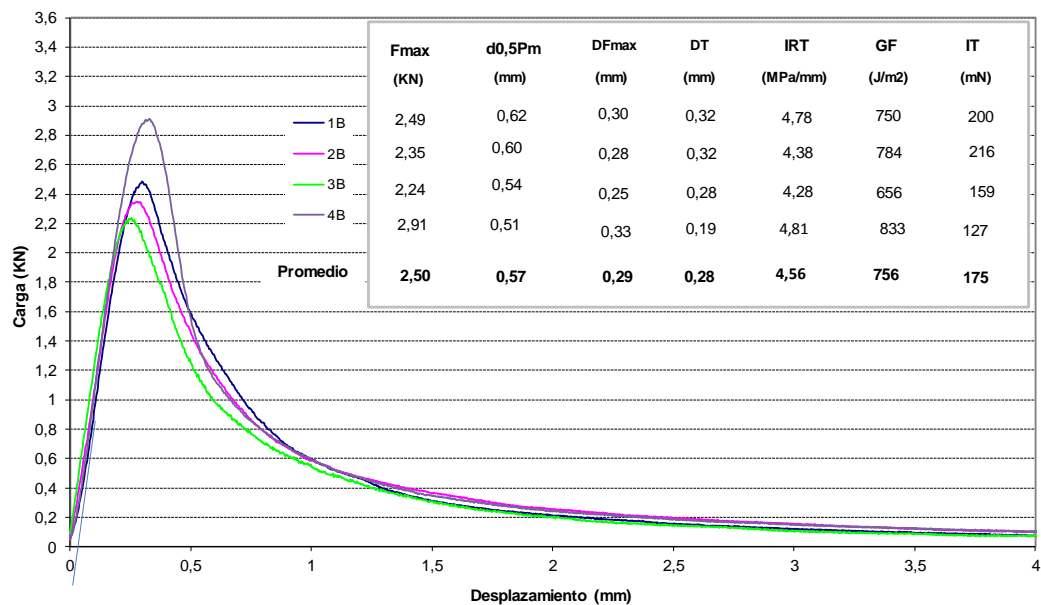


Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. AC16S 4,75%

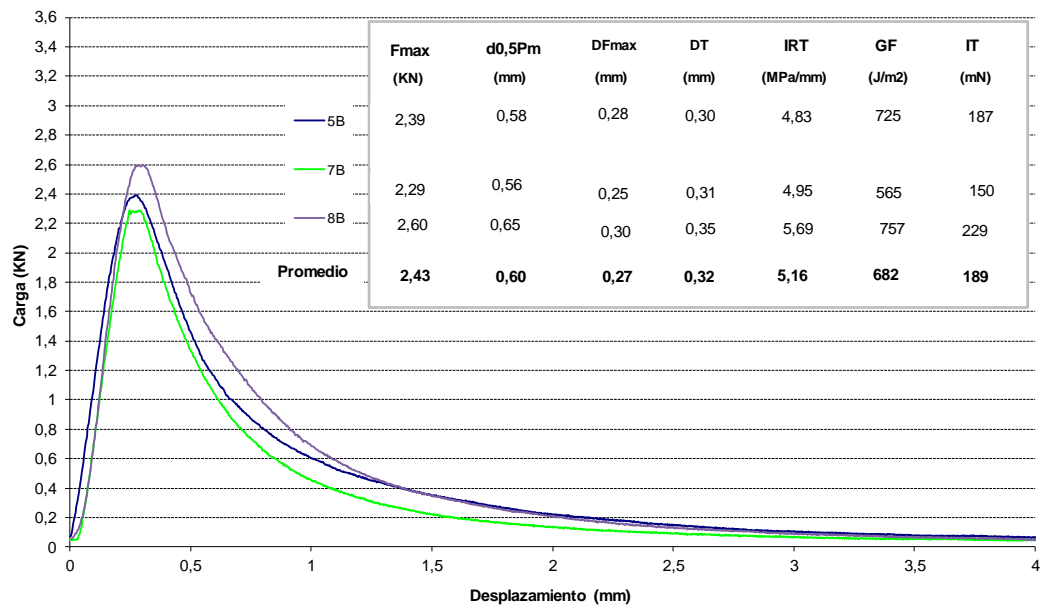


Mezclas con 4,75% de betún, 5°C

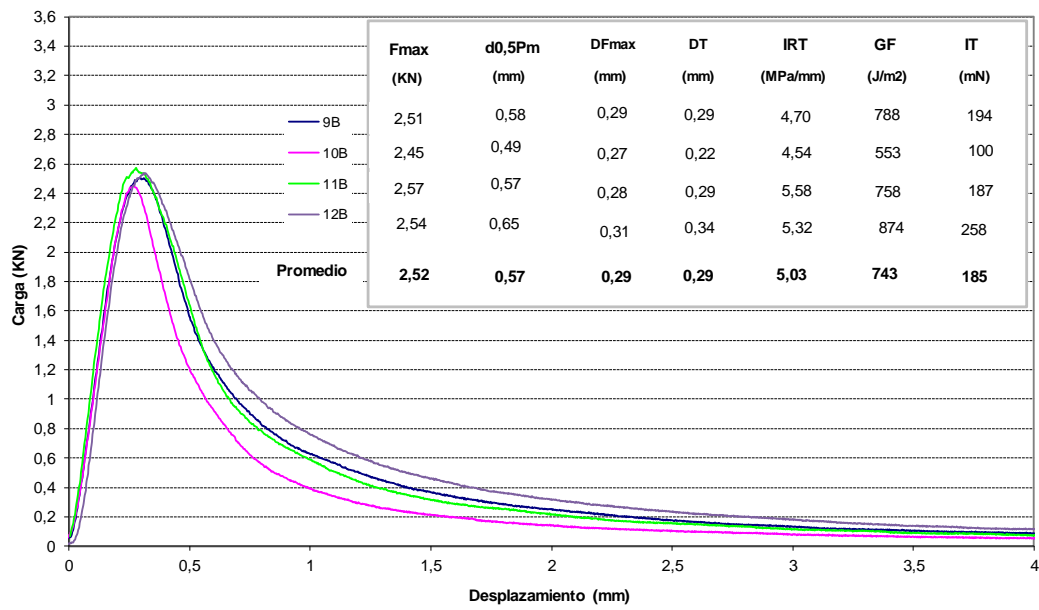
Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. AC16S 4,75%



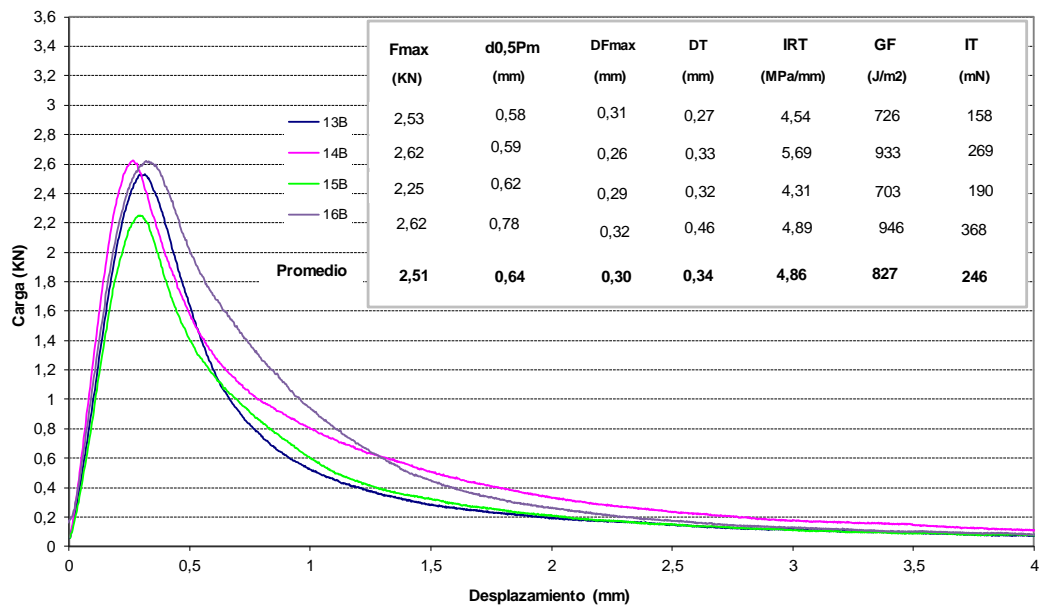
Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. AC16S 4,75%



Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. AC16S 4,75%

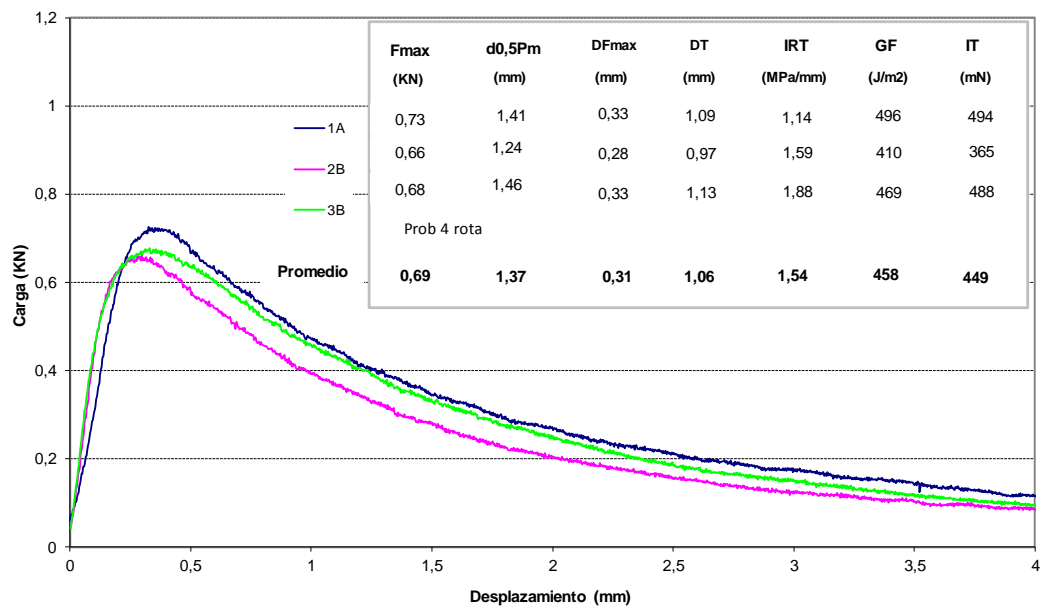


Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. AC16S 4,75%

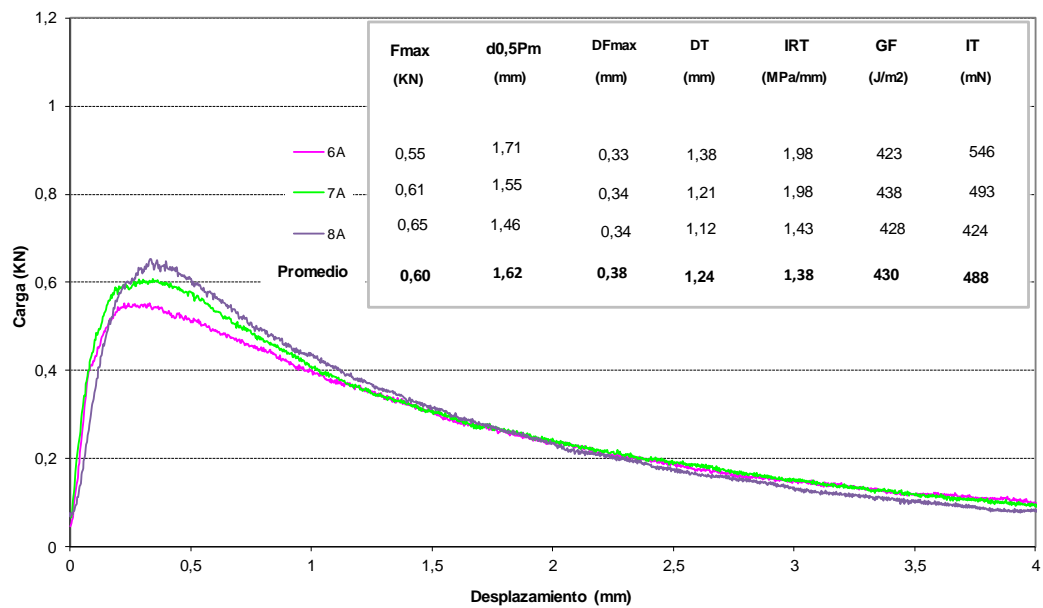


Mezclas con 4,75% de betún, 20°C

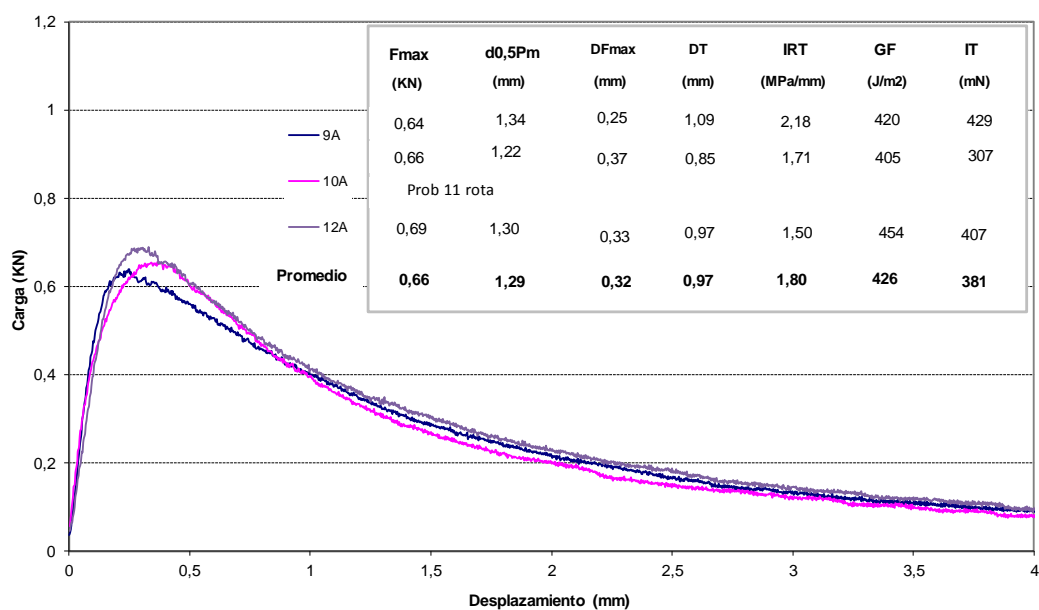
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. AC16S 5,5%



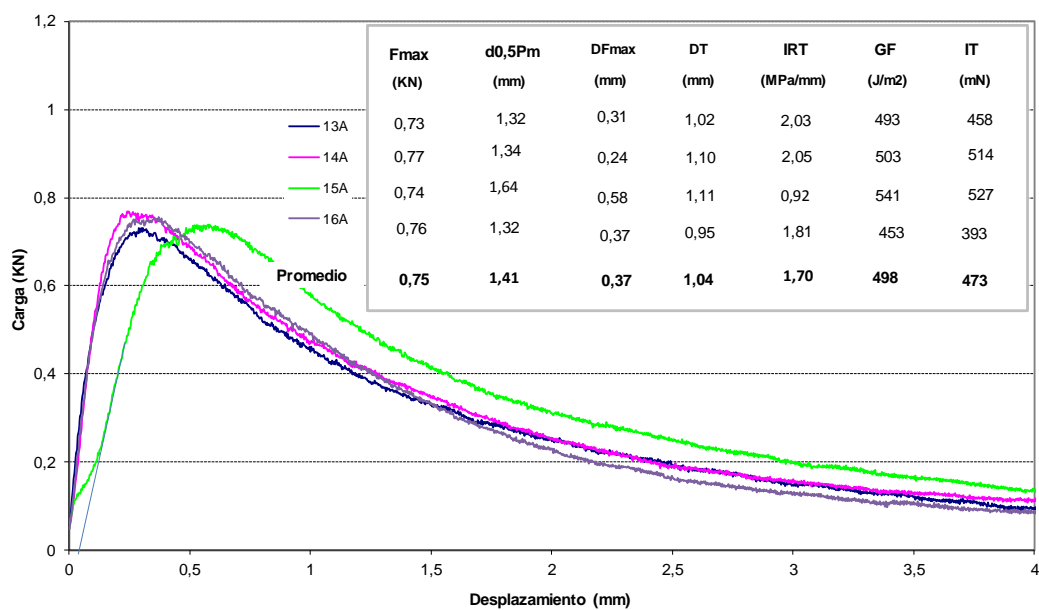
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. AC16S 5,5%



Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. AC16S 5,5%

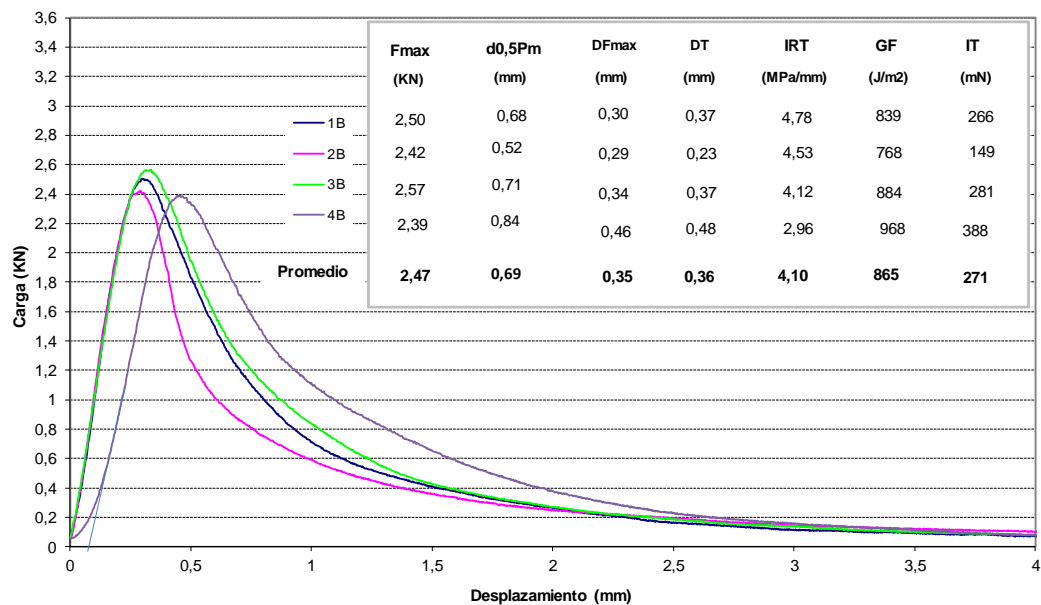


Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. AC16S 5,5%

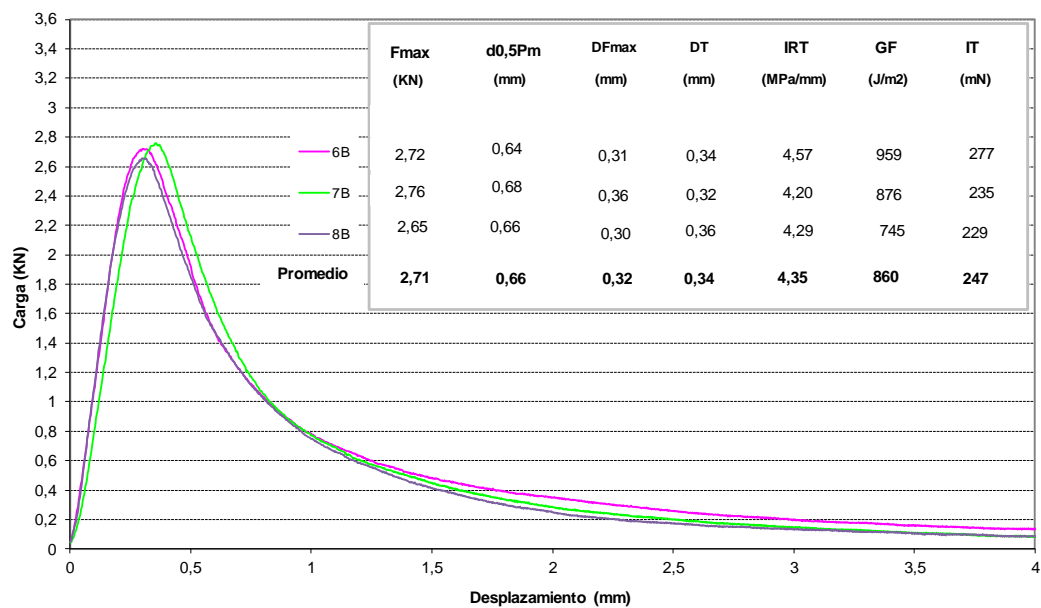


Mezclas con 4,75% de betún, 5°C

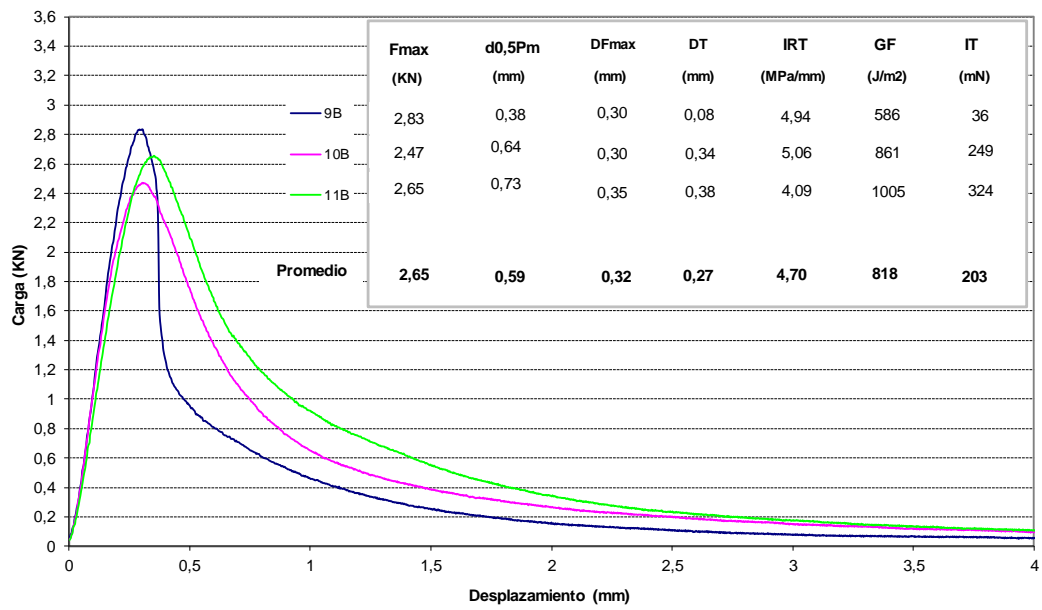
Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. AC16S 5,5%



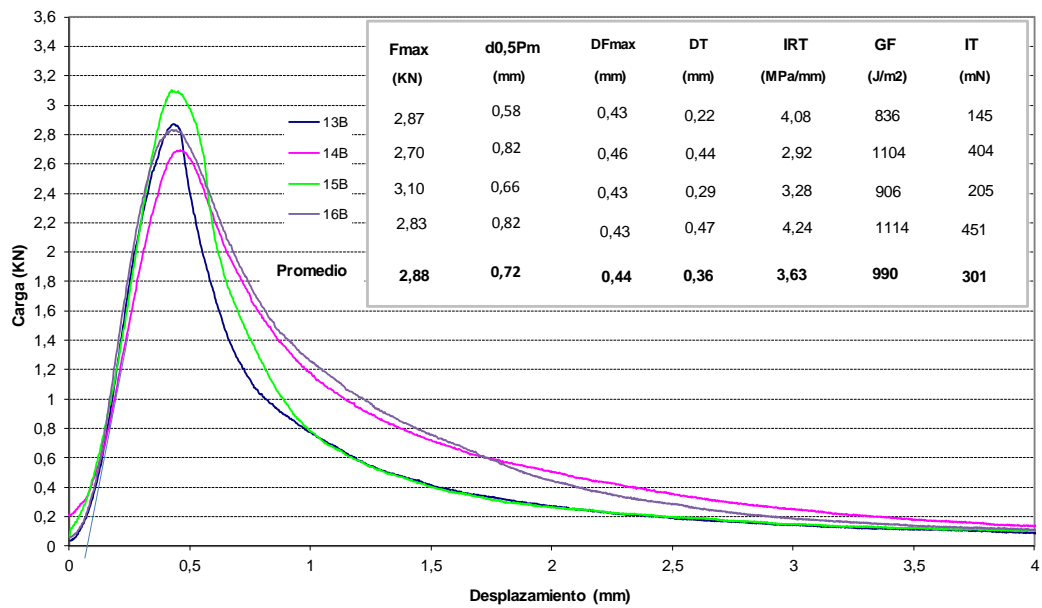
Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. AC16S 5,5%



Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. AC16S 5,5%



Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. AC16S 5,5%



ANEJO 2

RESUMEN DE RESULTADOS

Mezclas con 4% de betún ensayadas a 20°C

Probeta	Huecos (%)	Área de fractura Af (mm ²)	Carga Máxima Fmax (KN)	Resistencia a Tracción RT (Mpa)	Desplazamiento o a Fmax DFmax (mm)	Desplazamiento o de Rotura DR (mm)	Índice Rigidez a Tracción IRT/Af (MPa/mm)	Energía de Fractura GF (J/m ²)	Índice de Tenacidad IT (mN)	Desplazamiento o al 50% carga postpico d0,5Pm (mm)	d0,5Pm-dPmax DT (mm)
2A	5,62	2386,83	0,48	0,20	0,34	3,28	1,37	320,41	296,03	1,37	1,03
3A	5,29	2354,90	0,49	0,21	0,41	2,71	1,15	306,70	269,97	1,43	1,02
4A	5,24	2342,22	0,49	0,21	0,32	2,34	1,36	236,98	131,33	0,96	0,64
5A	5,62	2385,87	0,52	0,22	0,32	2,43	1,24	294,04	243,89	1,26	0,94
6A	5,33	2380,76	0,54	0,23	0,35	3,05	1,44	358,15	346,64	1,45	1,10
7A	5,29	2393,25	0,52	0,22	0,34	3,62	1,37	389,17	415,98	1,52	1,18
8A	5,35	2355,33	0,54	0,24	0,36	2,96	1,62	332,83	248,74	1,19	0,84
9A	5,52	2377,05	0,50	0,21	0,36	4,03	1,31	392,56	399,05	1,47	1,11
10A	5,29	2390,96	0,67	0,29	0,38	3,18	1,22	413,00	330,67	1,29	0,91
12A	5,40	2359,20	0,48	0,21	0,42	3,16	0,77	322,70	296,62	1,46	1,04
13A	5,36	2359,95	0,51	0,22	0,41	3,28	1,00	357,24	335,79	1,46	1,06
14A	5,10	2380,13	0,57	0,24	0,33	3,56	1,13	391,95	365,77	1,37	1,04
15A	5,71	2396,33	0,55	0,24	0,48	4,42	0,83	449,55	467,76	1,67	1,19
16A	5,82	2374,35	0,50	0,22	0,30	2,51	1,45	268,11	190,60	1,11	0,81
Media	5,42	2374,08	0,53	0,23	0,36	3,18	1,23	345,24	309,92	1,36	0,99
Desv	0,20	16,86	0,05	0,02	0,05	0,59	0,24	58,96	90,25	0,18	0,15
COV (%)	3,75	0,71	9,67	9,35	13,21	18,69	19,54	17,08	29,12	13,38	15,32

Mezclas con 4% de betún ensayadas a 5°C

Probeta	Huecos (%)	Área de fractura Af (mm ²)	Carga Máxima Fmax (KN)	Resistencia a Tracción RT (Mpa)	Desplazamiento o a Fmax DFmax (mm)	Desplazamiento o de Rotura DR (mm)	Índice Rigidez a Tracción IRT/Af (MPa/mm)	Energía de Fractura GF (J/m ²)	Índice de Tenacidad IT (mN)	Desplazamiento o al 50% carga postpico d0,5Pm (mm)	d0,5Pm-dPmax DT (mm)
2B	5,62	2363,14	1,98	0,85	0,26	2,46	4,75	608,41	174,40	0,61	0,35
3B	5,29	2345,95	1,91	0,83	0,33	3,09	3,70	715,59	279,67	0,73	0,45
4B	5,24	2396,13	2,24	0,95	0,28	3,50	4,45	752,97	211,86	0,61	0,33
5B	5,62	2344,11	2,15	0,94	0,29	4,03	4,60	874,08	289,53	0,67	0,38
6B	5,33	2356,25	1,92	0,83	0,40	3,11	3,40	757,05	278,95	0,77	0,45
7B	5,29	2324,53	2,22	0,97	0,27	2,71	4,98	528,28	58,26	0,41	0,14
8B	5,35	2379,24	2,16	0,93	0,31	3,06	3,97	654,83	142,98	0,58	0,27
9B	5,52	2350,14	1,87	0,81	0,26	4,38	2,84	850,35	304,57	0,69	0,44
10B	5,29	2343,38	2,35	1,02	0,33	2,94	4,00	693,14	160,09	0,58	0,28
12B	5,40	2309,32	1,94	0,86	0,22	2,88	4,50	639,53	216,09	0,60	0,39
13B	5,36	2345,17	2,19	0,95	0,26	4,25	4,77	722,19	134,21	0,47	0,22
14B	5,10	2341,46	2,11	0,92	0,29	2,83	4,07	742,00	264,43	0,70	0,41
15B	5,71	2384,36	1,98	0,85	0,25	2,73	4,70	577,52	144,12	0,54	0,29
16B	5,82	2437,46	2,36	0,99	0,30	3,15	4,25	727,02	195,84	0,62	0,32
Media	5,42	2358,62	2,10	0,91	0,29	3,22	4,21	703,07	203,93	0,61	0,34
Desv	0,20	32,20	0,16	0,07	0,05	0,60	0,60	96,35	72,81	0,10	0,09
COV (%)	3,75	1,37	7,82	7,41	15,82	18,46	14,20	13,70	35,71	16,03	27,42

Mezclas con 4,75% de betún ensayadas a 20°C

Probeta	Hueocs (%)	Área de fractura Af (mm ²)	Carga Máxima Fmax (KN)	Resistencia a Tracción RT (Mpa)	Desplazamient o a Fmax DFmax (mm)	Desplazamient o de Rotura DR (mm)	Índice Rigidez a Tracción IRT/Af (MPa/mm)	Energía de Fractura GF (J/m ²)	Índice de Tenacidad IT (mN)	Desplazamient o al 50% carga postpico d0,5Pm (mm)	d0,5Pm-dPmax DT (mm)
1A	4,00	2469,15	0,55	0,23	0,42	3,08	1,11	353,05	332,24	1,48	1,06
2A	4,11	2504,16	0,50	0,20	0,51	3,35	0,99	345,89	336,24	1,64	1,13
3A	5,26	2535,52	0,53	0,21	0,36	3,38	1,62	348,97	356,00	1,47	1,11
4A	3,52	2466,36	0,67	0,27	0,36	4,22	1,48	481,30	527,42	1,55	1,20
5A	4,99	2484,50	0,50	0,20	0,34	3,16	1,25	341,87	388,77	1,60	1,26
6A	3,86	2529,15	0,58	0,23	0,46	3,31	1,04	366,00	319,51	1,45	0,99
7A	4,40	2460,47	0,55	0,23	0,48	3,43	0,99	357,70	297,07	1,43	0,95
8A	3,81	2531,58	0,60	0,24	0,38	2,91	1,47	339,39	258,67	1,24	0,86
9A	4,97	2479,40	0,51	0,21	0,40	3,00	1,29	318,38	284,21	1,39	0,99
11A	5,02	2523,68	0,66	0,27	0,37	3,50	1,64	444,98	476,05	1,54	1,17
12A	4,02	2602,75	0,58	0,23	0,33	3,67	1,69	358,01	307,30	1,27	0,94
13A	4,38	2510,85	0,62	0,25	0,34	3,50	1,66	382,10	315,15	1,25	0,91
14A	3,96	2553,12	0,55	0,22	0,38	2,99	1,56	303,22	230,39	1,24	0,86
16A	3,61	2545,69	0,51	0,21	0,41	4,22	1,31	432,85	616,35	1,95	1,54
Media	4,28	2514,03	0,56	0,23	0,40	3,41	1,37	369,55	360,38	1,46	1,07
Desv	0,57	40,03	0,06	0,02	0,06	0,41	0,26	50,06	108,34	0,20	0,19
COV (%)	13,32	1,59	9,93	10,05	14,03	11,99	18,91	13,55	30,06	13,34	17,40

Mezclas con 4,75% de betún ensayadas a 5°C

Probeta	Hueocs (%)	Área de fractura Af (mm ²)	Carga Máxima Fmax (KN)	Resistencia a Tracción RT (Mpa)	Desplazamient o a Fmax DFmax (mm)	Desplazamient o de Rotura DR (mm)	Índice Rigidez a Tracción IRT/Af (MPa/mm)	Energía de Fractura GF (J/m ²)	Índice de Tenacidad IT (mN)	Desplazamient o al 50% carga postpico d0,5Pm (mm)	d0,5Pm-dPmax DT (mm)
1B	4,00	2501,60	2,49	1,01	0,30	3,43	4,78	750,26	200,39	0,62	0,32
2B	4,11	2524,88	2,35	0,95	0,28	4,12	4,38	784,40	215,85	0,60	0,32
3B	5,26	2568,41	2,24	0,89	0,25	3,00	4,28	655,65	158,91	0,54	0,28
4B	3,52	2516,45	2,91	1,18	0,33	4,03	4,81	833,40	126,68	0,51	0,19
5B	4,99	2517,15	2,39	0,97	0,28	3,01	4,83	724,98	187,18	0,58	0,30
7B	4,40	2450,67	2,29	0,93	0,25	2,32	4,95	564,84	149,58	0,56	0,31
8B	3,81	2522,65	2,60	1,05	0,30	2,88	4,33	756,53	229,01	0,65	0,35
9B	4,97	2526,63	2,51	1,01	0,29	3,54	4,70	788,42	194,16	0,58	0,29
10B	5,33	2579,41	2,45	0,97	0,27	2,68	4,54	552,80	99,87	0,49	0,22
11B	5,02	2529,58	2,57	1,04	0,28	3,32	4,65	757,72	186,78	0,57	0,29
12B	4,02	2563,86	2,54	1,01	0,31	4,07	4,78	874,07	257,95	0,65	0,34
13B	4,38	2490,29	2,53	1,04	0,31	3,34	4,54	726,05	157,62	0,58	0,27
14B	3,96	2529,48	2,62	1,06	0,26	4,26	4,63	933,20	269,12	0,59	0,33
15B	4,94	2490,06	2,25	0,92	0,29	3,21	4,31	702,58	190,11	0,62	0,32
16B	3,61	2519,08	2,62	1,06	0,32	3,43	4,89	946,43	368,03	0,78	0,46
Media	4,42	2525,61	2,49	1,01	0,29	3,38	4,63	756,76	199,42	0,60	0,31
Desv	0,61	26,67	0,17	0,07	0,02	0,56	0,22	114,05	65,11	0,07	0,06
COV (%)	13,90	1,06	7,02	7,14	8,31	16,69	4,77	15,07	32,65	11,36	19,82

Mezclas con 5,5% de betún ensayadas a 20°C

Probeta	Huecos (%)	Área de fractura Af (mm ²)	Carga Máxima Fmax (KN)	Resistencia a Tracción RT (Mpa)	Desplazamient o a Fmax DFmax (mm)	Desplazamient o de Rotura DR (mm)	Índice Rigidez a Tracción IRT/Af (MPa/mm)	Energía de Fractura GF (J/m ²)	Índice de Tenacidad IT (mN)	Desplazamient o al 50% carga postpico d0,5Pm (mm)	d0,5Pm-dPmax DT (mm)
1A	2,96	2480,19	0,73	0,30	0,33	4,12	1,14	495,65	493,78	1,41	1,09
2A	3,28	2471,63	0,66	0,27	0,28	3,68	1,59	410,18	364,92	1,24	0,97
3A	3,23	2530,02	0,68	0,27	0,33	3,92	1,88	469,18	488,36	1,46	1,13
5A	3,02	2565,55	0,62	0,25	0,53	3,74	0,78	445,86	428,15	1,75	1,13
6A	3,60	2552,55	0,55	0,22	0,33	3,99	1,98	423,13	546,44	1,71	1,38
7A	3,15	2555,92	0,61	0,24	0,34	3,82	1,98	437,77	493,13	1,55	1,21
8A	3,25	2497,69	0,65	0,27	0,34	3,59	1,43	427,93	424,07	1,46	1,12
9A	3,18	2499,00	0,64	0,26	0,25	3,78	2,18	419,77	429,24	1,34	1,09
10A	3,40	2461,86	0,66	0,27	0,37	3,34	1,71	405,25	307,46	1,22	0,85
12A	3,25	2473,34	0,69	0,28	0,33	4,07	1,50	453,63	406,81	1,30	0,97
13A	3,06	2473,34	0,73	0,30	0,31	3,88	2,03	493,04	457,86	1,32	1,02
14A	3,51	2546,17	0,77	0,31	0,24	4,24	2,05	502,79	514,32	1,34	1,10
15A	3,53	2600,43	0,74	0,29	0,48	4,32	0,92	536,40	526,77	1,64	1,11
16A	3,10	2607,76	0,76	0,30	0,37	3,52	1,81	452,73	392,57	1,32	0,95
Media	3,25	2522,53	0,68	0,27	0,34	3,86	1,64	455,24	448,13	1,43	1,08
Desv	0,20	49,53	0,06	0,02	0,08	0,28	0,44	39,29	67,31	0,17	0,13
COV (%)	6,03	1,96	9,15	9,10	22,80	7,18	26,66	8,63	15,02	11,81	11,74

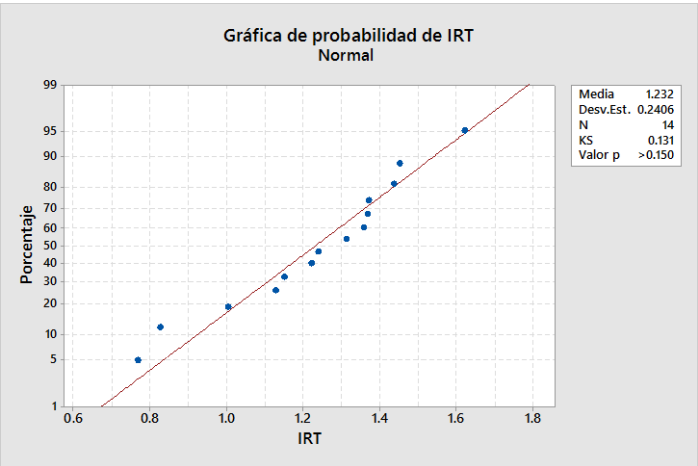
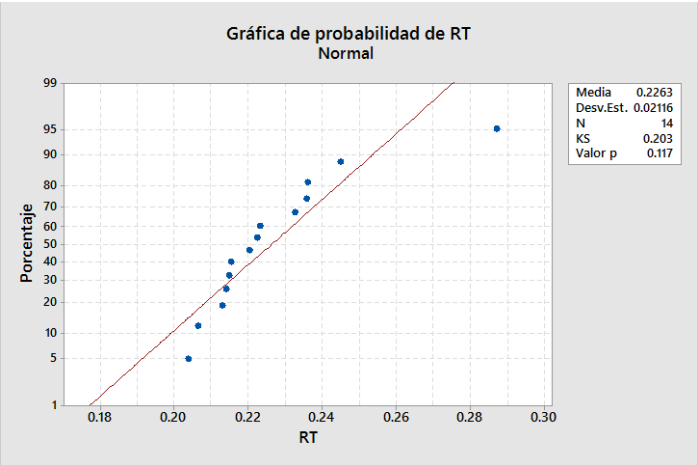
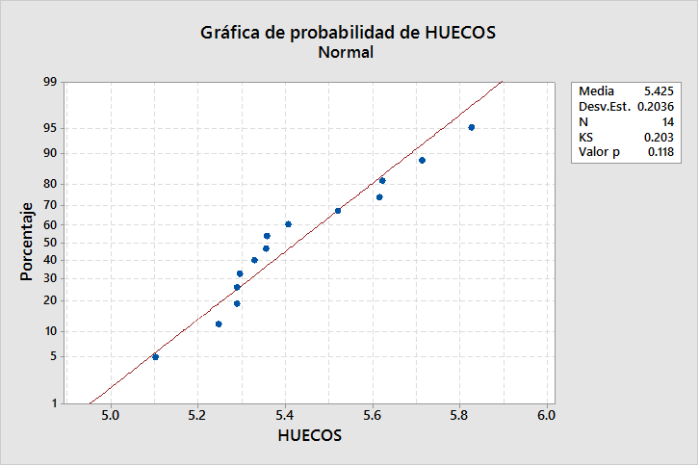
Mezclas con 5,5% de betún ensayadas a 5°C

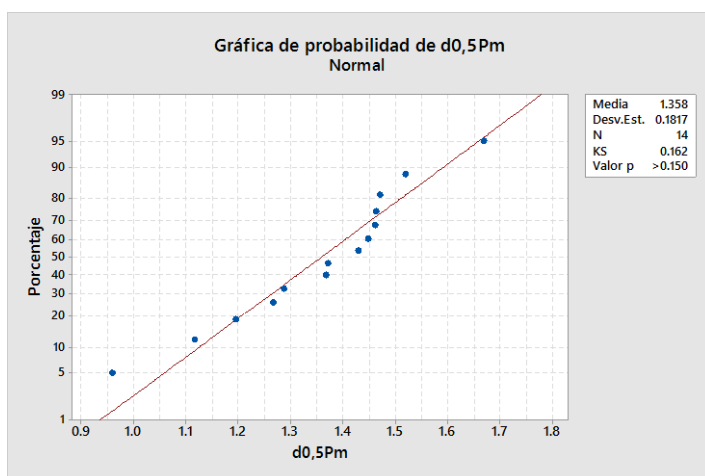
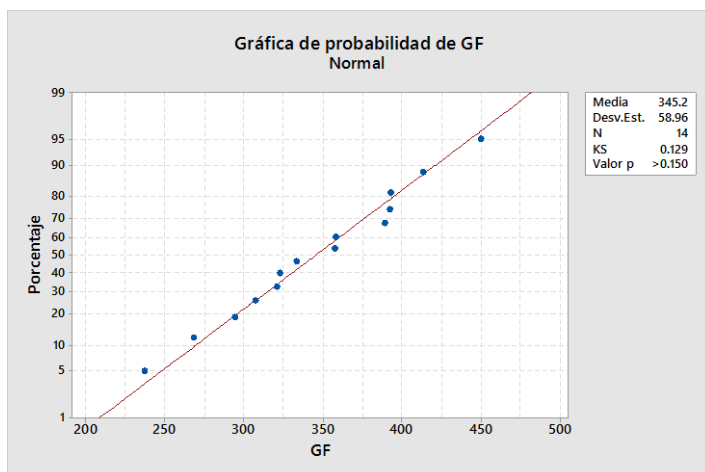
Probeta	Huecos (%)	Área de fractura Af (mm2)	Carga Máxima Fmax (KN)	Resistencia a Tracción RT (Mpa)	Desplazamient o a Fmax DFmax (mm)	Desplazamient o de Rotura DR (mm)	Índice Rigidez a Tracción IRT/Af (MPa/mm)	Energía de Fractura GF (J/m2)	Índice de Tenacidad IT (mN)	Desplazamient o al 50% carga postpico d0,5Pm (mm)	d0,5Pm-dPmax DT (mm)
1B	2,96	2509,51	2,50	1,02	0,30	3,31	4,78	839,24	266,49	0,68	0,37
2B	3,28	2512,58	2,42	0,98	0,29	4,13	4,53	768,11	149,35	0,52	0,23
3B	3,23	2559,82	2,57	1,02	0,34	3,56	4,12	884,11	280,59	0,71	0,37
4B	3,24	2550,24	2,39	0,96	0,46	3,67	2,96	967,58	387,59	0,84	0,48
6B	3,60	2591,23	2,72	1,07	0,31	4,42	4,57	959,10	277,40	0,64	0,34
7B	3,15	2624,04	2,76	1,07	0,36	3,63	4,20	876,06	235,49	0,68	0,32
8B	3,25	2958,48	2,65	0,91	0,30	3,58	4,29	745,21	228,59	0,66	0,36
9B	3,18	2558,50	2,83	1,13	0,30	2,55	4,94	585,88	36,17	0,38	0,08
10B	3,40	2470,70	2,47	1,02	0,30	3,90	5,06	861,22	248,73	0,64	0,34
11B	3,42	2519,17	2,65	1,07	0,35	4,23	4,09	1005,47	323,78	0,73	0,38
13B	3,06	2612,22	2,87	1,12	0,43	3,86	4,08	835,83	145,11	0,66	0,22
14B	3,51	2648,72	2,70	1,04	0,46	4,31	2,92	1103,63	403,94	0,90	0,44
15B	3,53	2650,55	3,10	1,19	0,43	4,08	3,28	906,42	205,20	0,71	0,29
16B	3,10	2669,92	2,83	1,08	0,43	4,18	4,24	1114,17	451,10	0,90	0,47
Media	3,28	2602,55	2,68	1,05	0,36	3,82	4,15	889,43	259,97	0,69	0,34
Desv	0,19	118,95	0,20	0,07	0,06	0,49	0,67	140,10	110,46	0,14	0,11
COV (%)	5,76	4,57	7,39	6,95	18,00	12,84	16,26	15,75	42,49	19,81	31,74

ANEJO 3

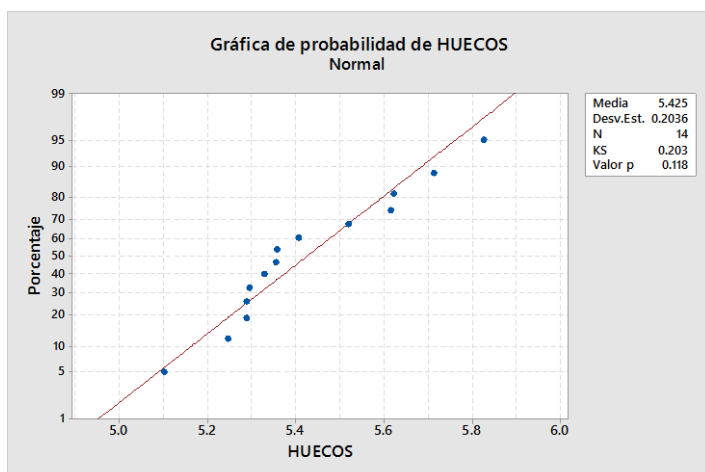
ANÁLISIS DE NORMALIDAD - Test Kolmogorov-Smirnov

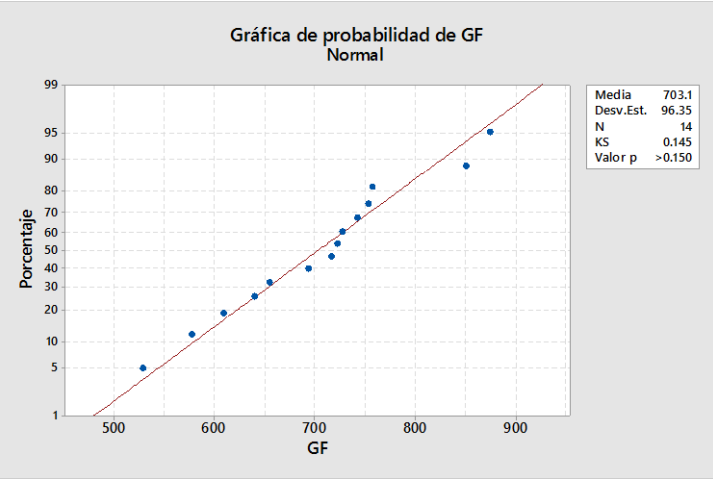
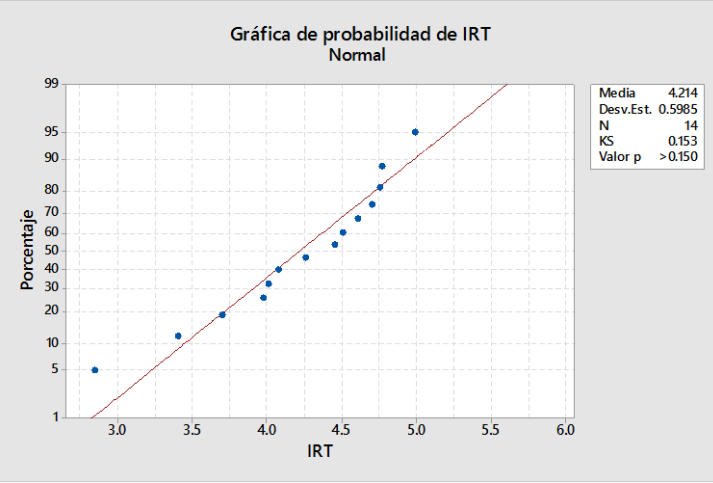
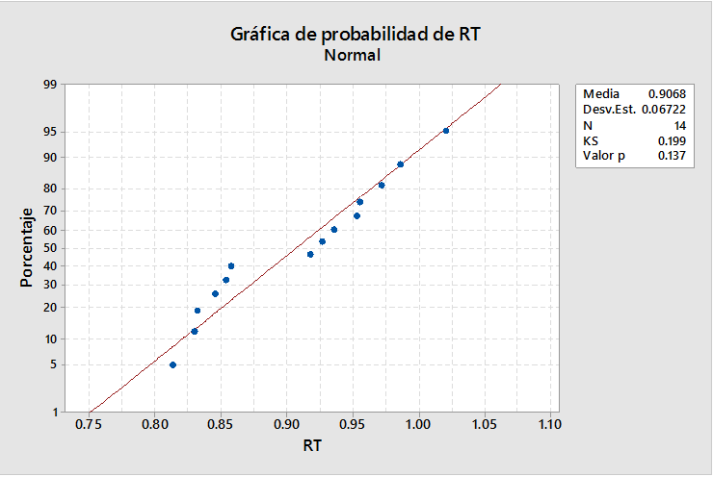
4% 20°C

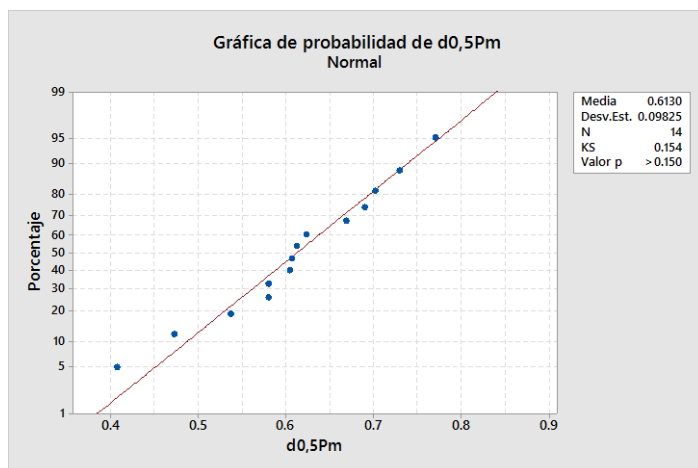




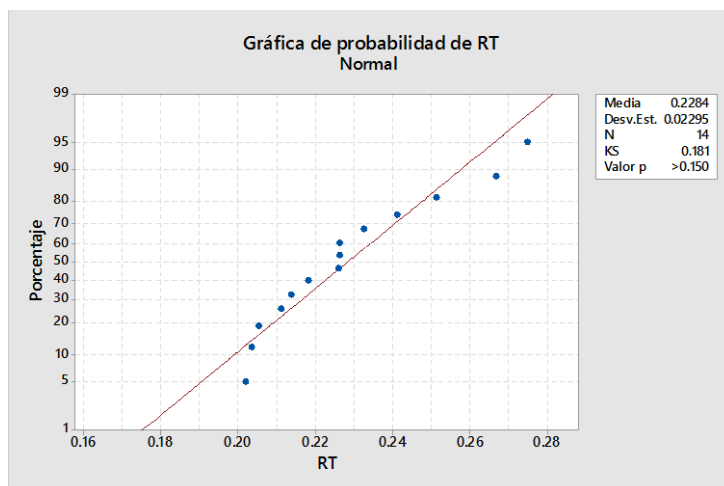
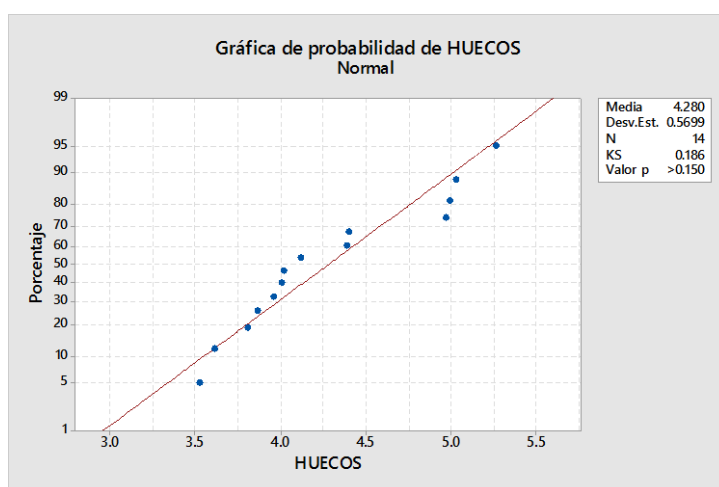
4% 5°C

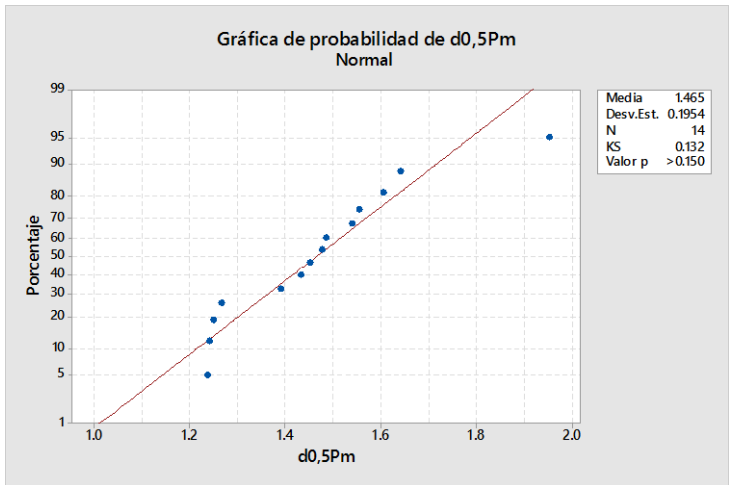
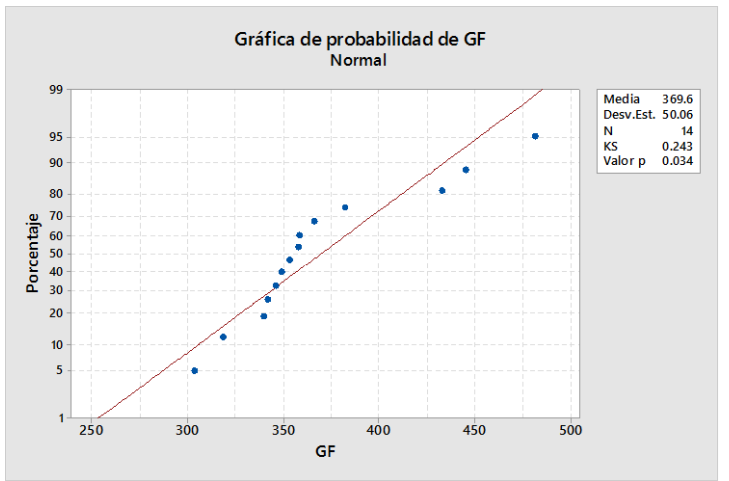
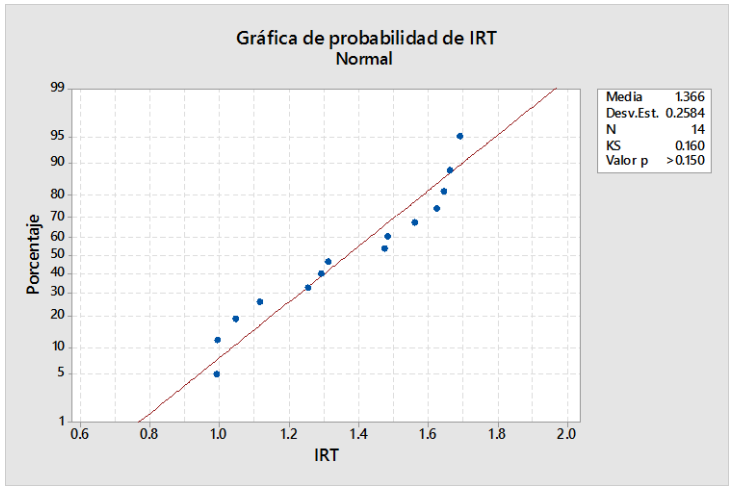




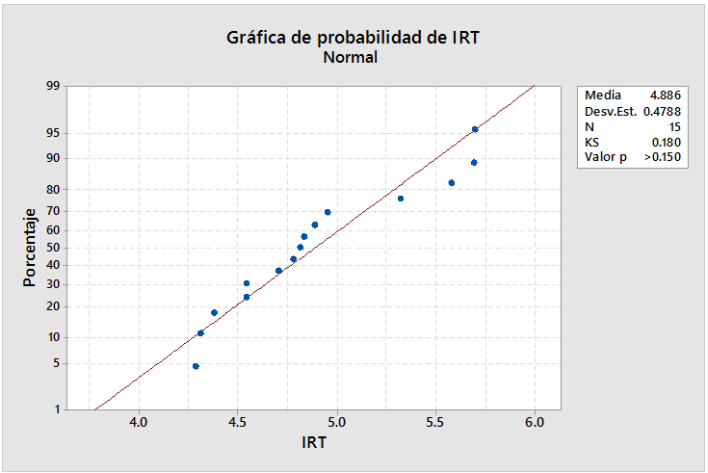
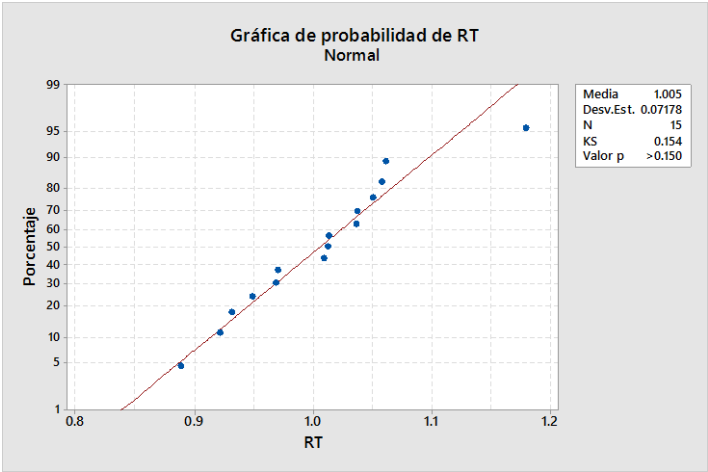
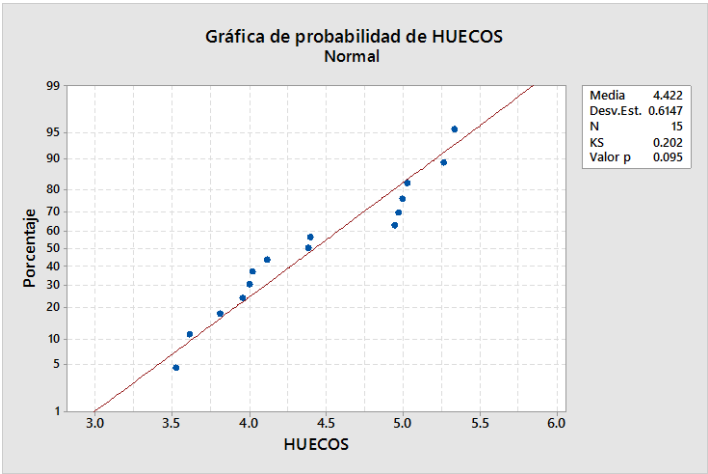


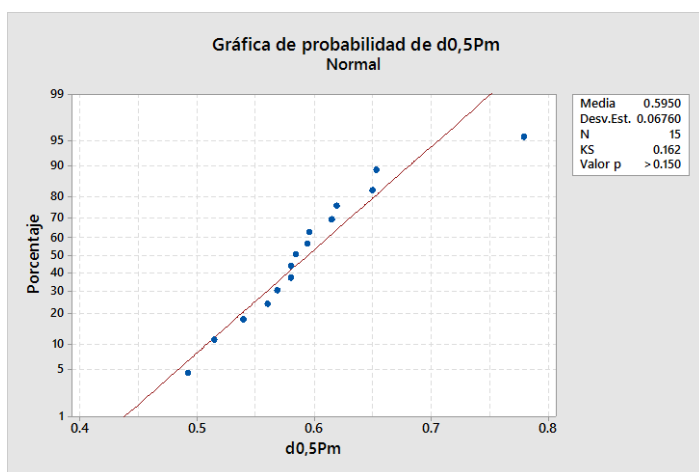
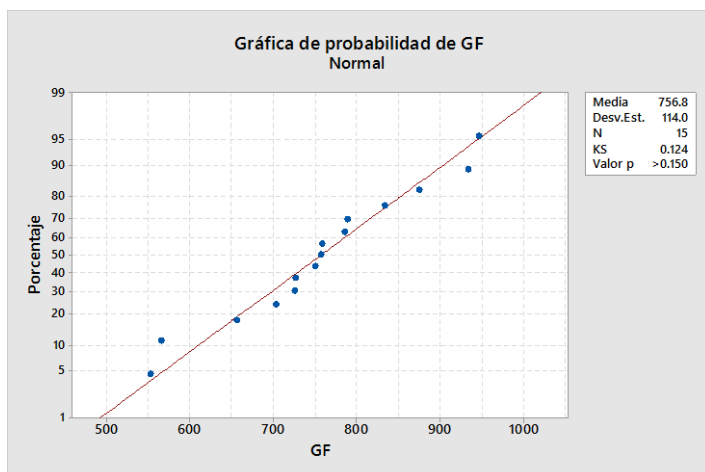
4,75% 20°C



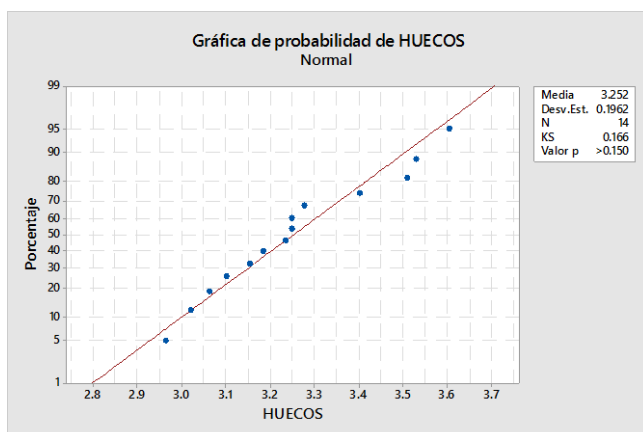


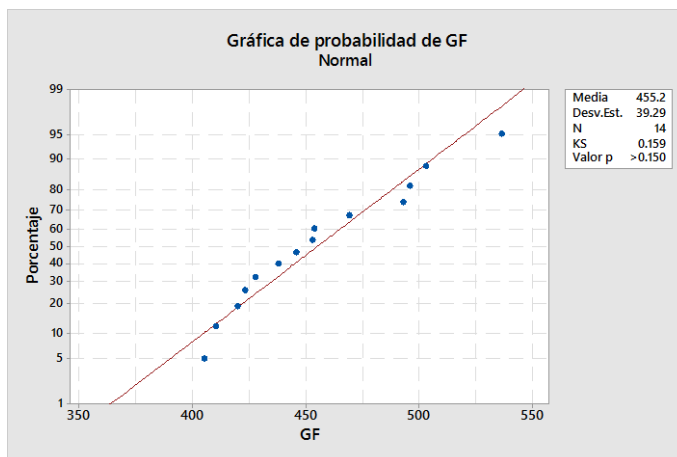
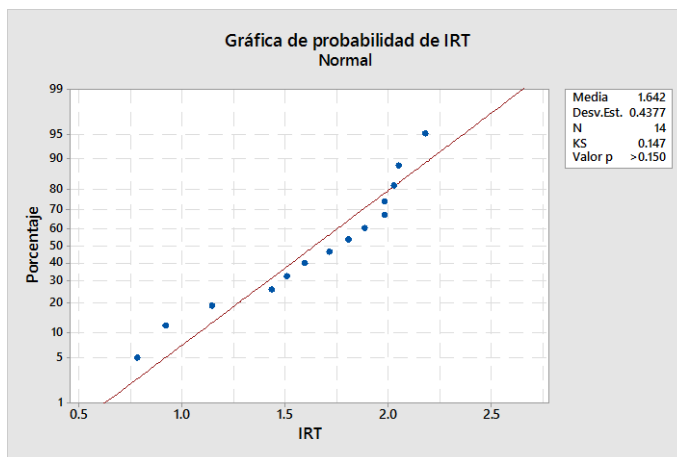
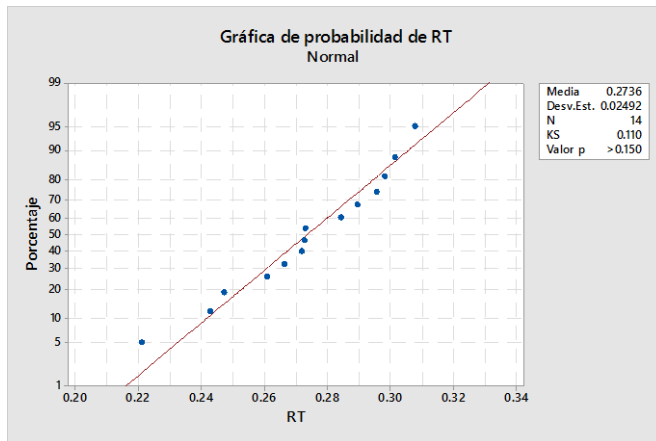
4,75% 5°C

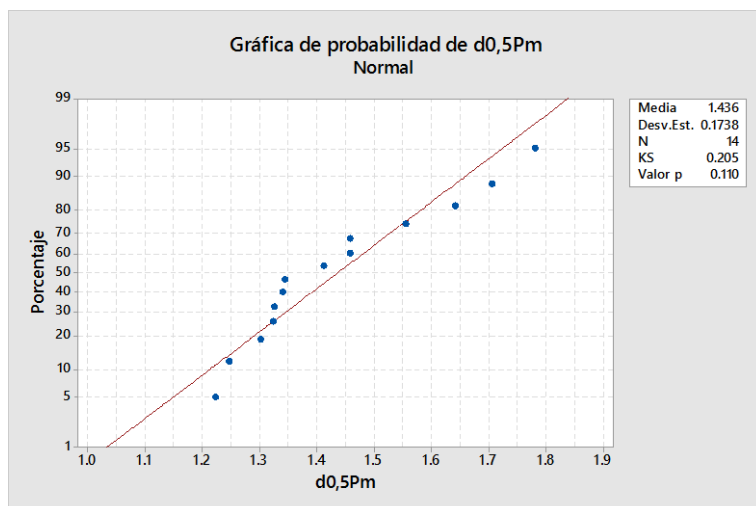




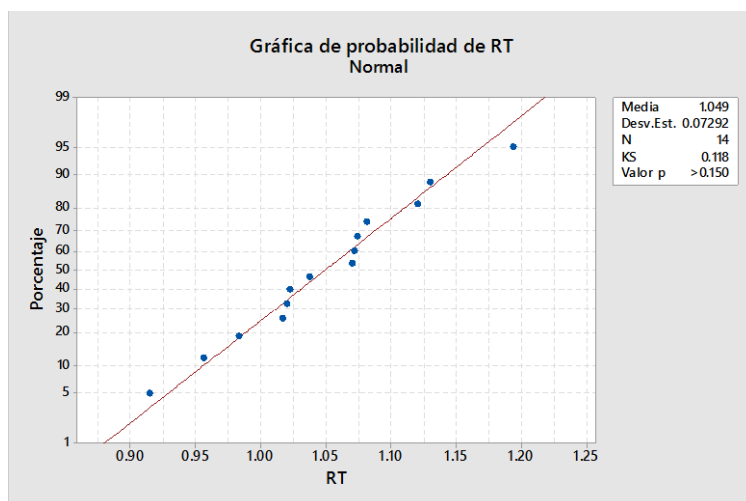
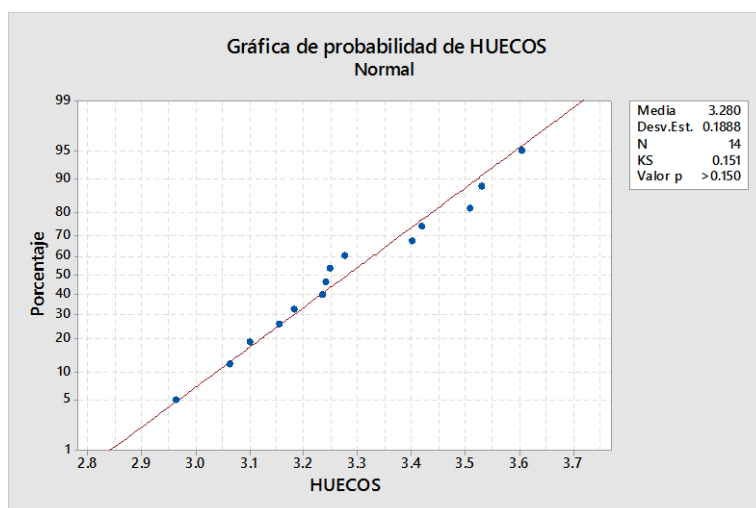
5,5% 20°C

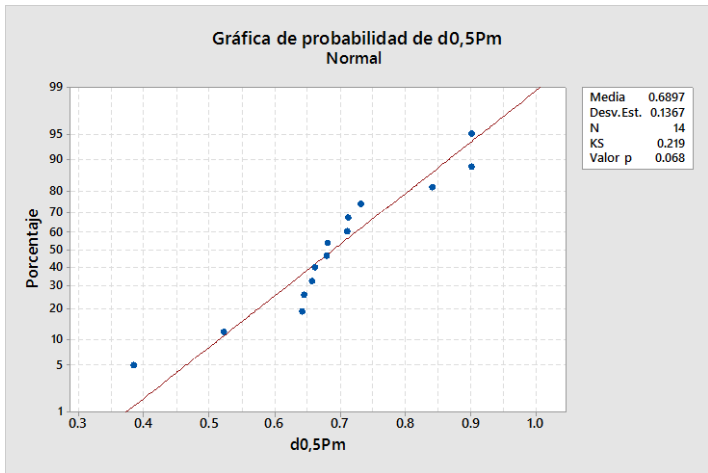
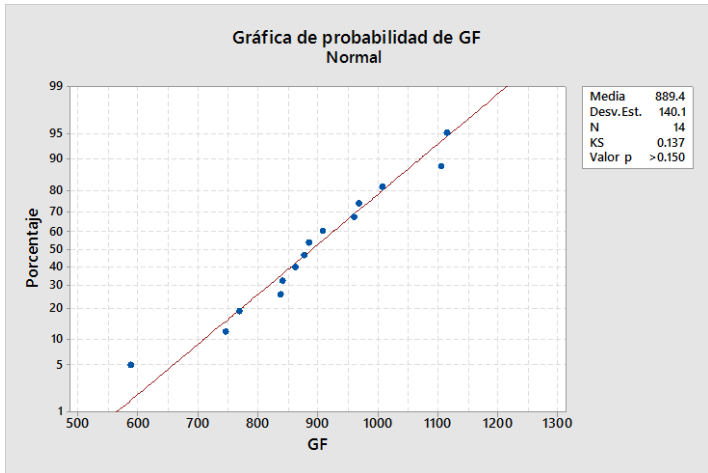
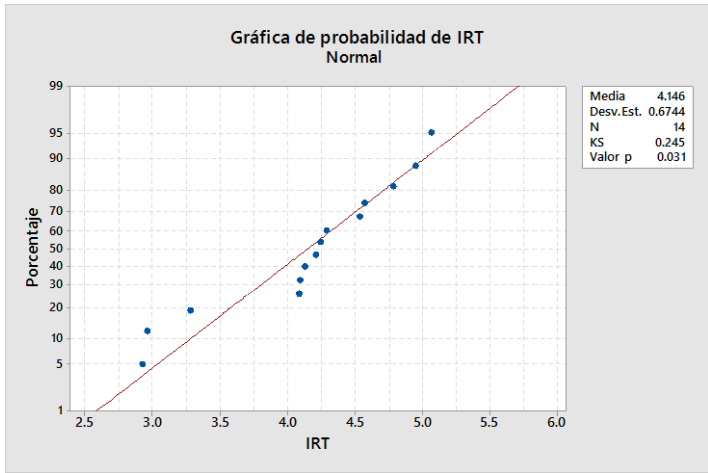






5,5% 5°C

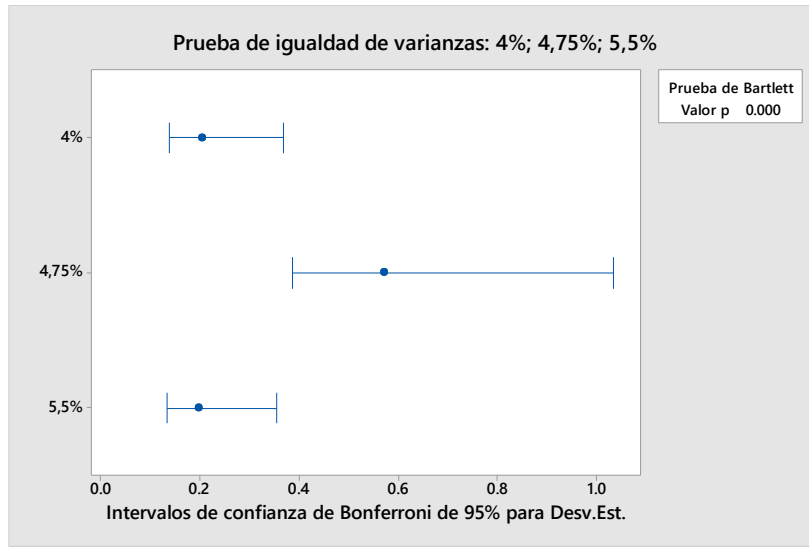




ANEJO 4

ANÁLISIS DE HOMOCEDASTICIDAD Y ANOVA DE UN SOLO FACTOR

Huecos



Prueba de igualdad de varianzas: 4%; 4,75%; 5,5%

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

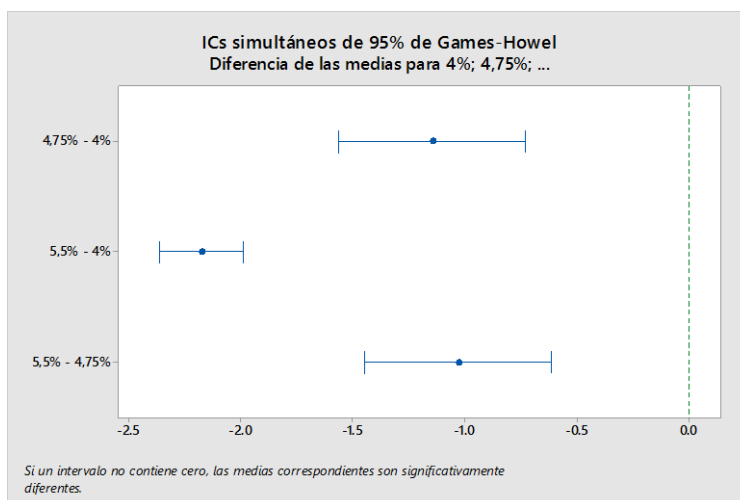
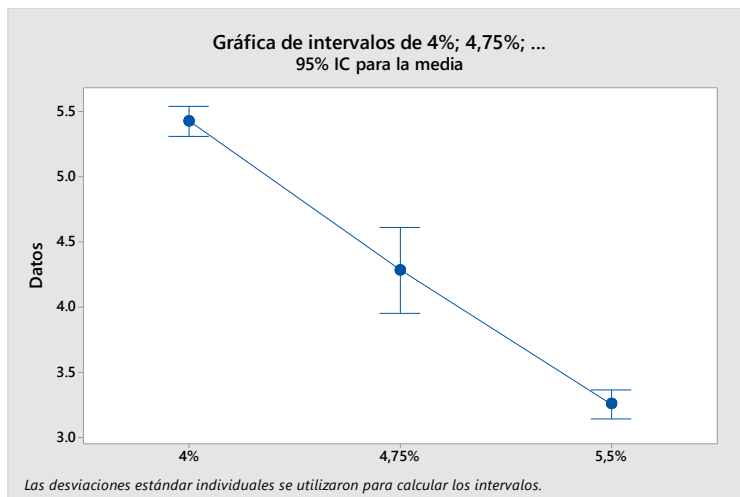
Muestra	N	Desv.Est.	IC
4%	14	0.203575	(0.138082; 0.36911)
4,75%	14	0.569922	(0.386571; 1.03335)
5,5%	14	0.196190	(0.133074; 0.35572)

Nivel de confianza individual = 98.3333%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Bartlett	19.56	0.000

Prueba de igualdad de varianzas: 4%; 4,75%; 5,5%



ANOVA de un solo factor: 4%, 4,75%, 5,5%

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
 Hipótesis alterna No todas las medias son iguales
 Nivel de significancia $\alpha = 0.05$
 No se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	3	4%, 4,75%, 5,5%

Prueba de Welch

Fuente	GL		Valor F	Valor p
	Num	GL Den		
Factor	2	23.9452	402.29	0.000

Resumen del modelo

R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
86.28%	85.57%	84.09%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
4%	14	5.4248	0.2036	(5.3073, 5.5423)
4,75%	14	4.280	0.570	(3.951, 4.609)
5,5%	14	3.2519	0.1962	(3.1386, 3.3651)

Comparaciones en parejas de Games-Howell

Agrupar información utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
4%	14	5.4248	A
4,75%	14	4.280	B
5,5%	14	3.2519	C

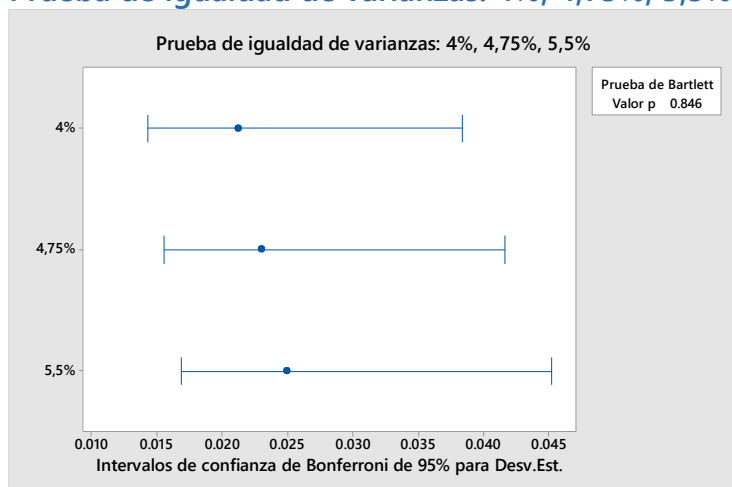
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ICs simultáneos de 95% de Games-Howell

Gráfica de intervalos de 4%, 4,75%, ...

RT 20 C

Prueba de igualdad de varianzas: 4%, 4,75%, 5,5%



Prueba de igualdad de varianzas: 4%; 4,75%; 5,5%

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

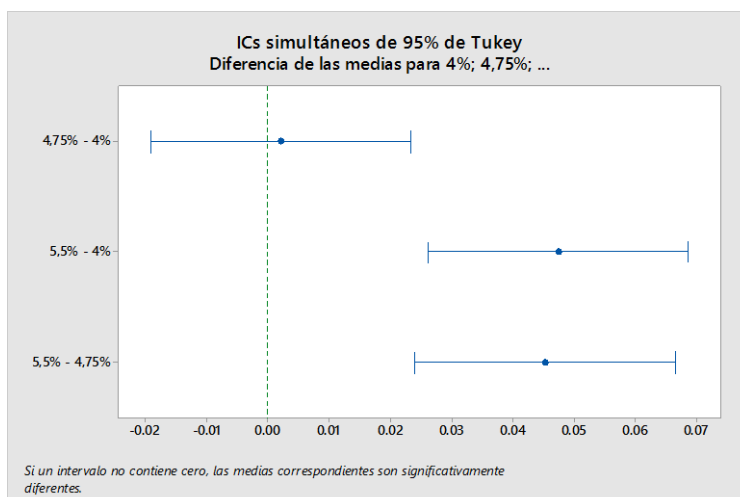
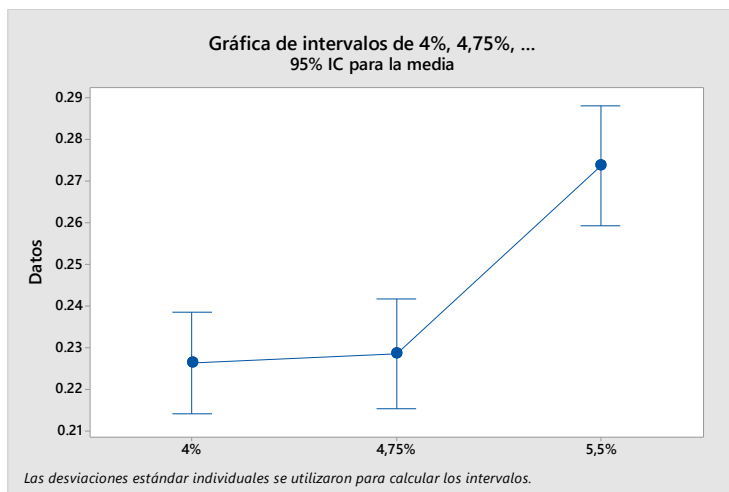
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
4%	14	0.0211574	(0.0143508; 0.0383613)
4,75%	14	0.0229535	(0.0155691; 0.0416179)
5,5%	14	0.0249153	(0.0168998; 0.0451748)

Nivel de confianza individual = 98.3333%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Bartlett	0.34	0.846



ANOVA de un solo factor: 4%, 4,75%, 5,5%

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$
<i>Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.</i>	

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	3	4%, 4,75%, 5,5%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	0.02003	0.010013	18.83	0.000
Error	39	0.02074	0.000532		
Total	41	0.04077			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0230599	49.13%	46.52%	41.00%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
4%	14	0.22631	0.02116	(0.21385, 0.23878)
4,75%	14	0.22841	0.02295	(0.21595, 0.24088)
5,5%	14	0.27365	0.02492	(0.26118, 0.28612)

Desv.Est. agrupada = 0.0230599

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

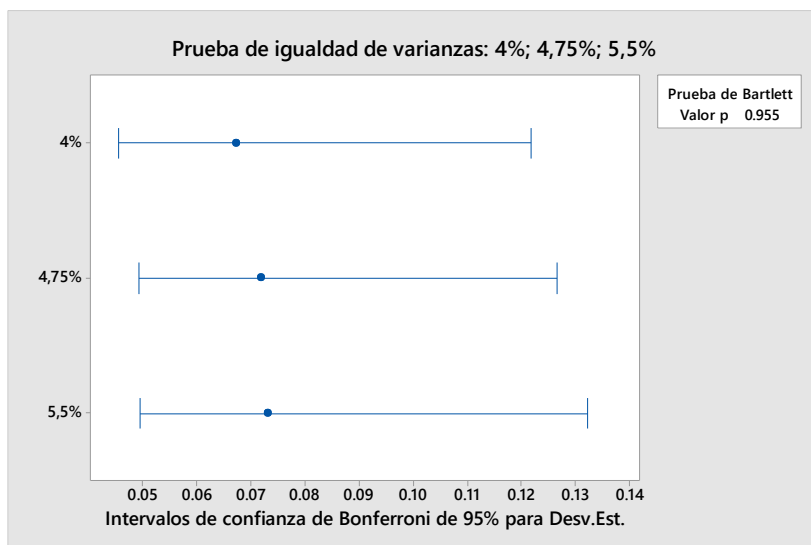
Factor	N	Media	Agrupación
5,5%	14	0.27365	A
4,75%	14	0.22841	B
4%	14	0.22631	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ICs simultáneos de 95% de Tukey

Gráfica de intervalos de 4%, 4,75%, ...

RT 5 C



Prueba de igualdad de varianzas: 4%; 4,75%; 5,5%

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

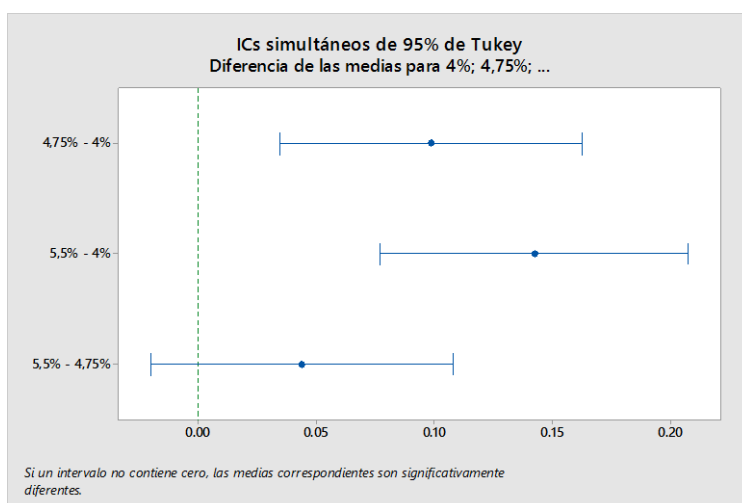
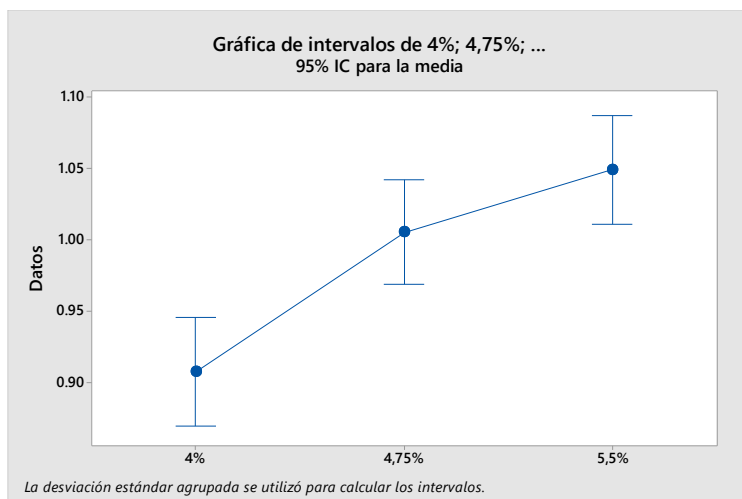
Muestra	N	Desv.Est.	IC
4%	14	0.0672153	(0.0455914; 0.121871)
4,75%	15	0.0717836	(0.0492663; 0.126672)
5,5%	14	0.0729172	(0.0494589; 0.132209)

Nivel de confianza individual = 98.3333%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Bartlett	0.09	0.955

Prueba de igualdad de varianzas: 4%; 4,75%; 5,5%



ANOVA de un solo factor: 4%; 4,75%; 5,5%

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales

Hipótesis alterna No todas las medias son iguales

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	3	4%; 4,75%; 5,5%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	0.1493	0.074640	14.93	0.000
Error	40	0.2000	0.005000		
Total	42	0.3493			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0707094	42.74%	39.88%	33.84%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
4%	14	0.9068	0.0672	(0.8686; 0.9450)
4,75%	15	1.0054	0.0718	(0.9685; 1.0423)
5,5%	14	1.0492	0.0729	(1.0110; 1.0874)

Desv.Est. agrupada = 0.0707094

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
5,5%	14	1.0492	A
4,75%	15	1.0054	A
4%	14	0.9068	B

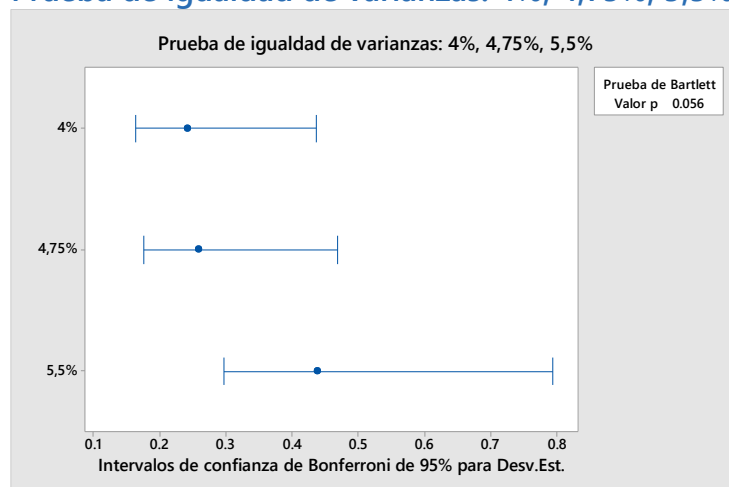
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ICs simultáneos de 95% de Tukey

Gráfica de intervalos de 4%; 4,75%; ...

IRT 20 C

Prueba de igualdad de varianzas: 4%, 4,75%, 5,5%



Prueba de igualdad de varianzas: 4%; 4,75%; 5,5%

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales
 Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

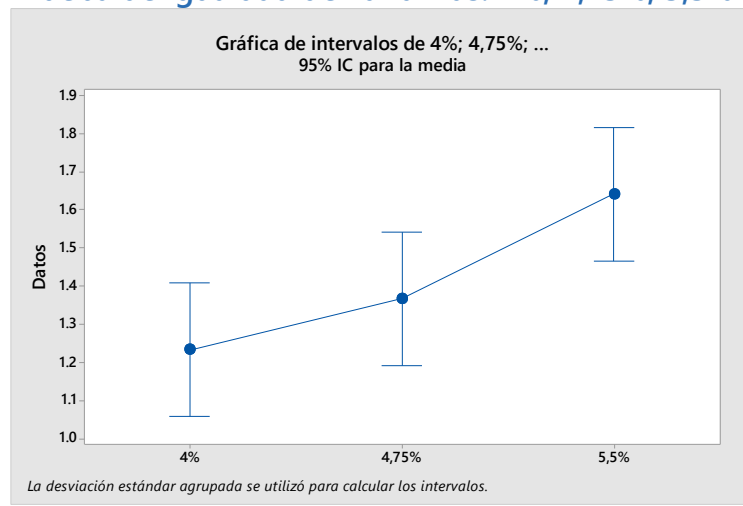
Muestra	N	Desv.Est.	IC
4%	14	0.240640	(0.163223; 0.436314)
4,75%	14	0.258399	(0.175269; 0.468513)
5,5%	14	0.437710	(0.296893; 0.793627)

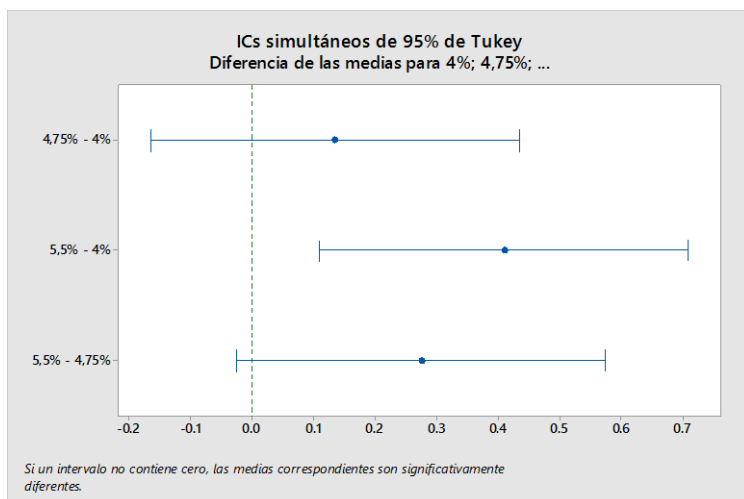
Nivel de confianza individual = 98.3333%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Bartlett	5.76	0.056

Prueba de igualdad de varianzas: 4%; 4,75%; 5,5%





ANOVA de un solo factor: 4%, 4,75%, 5,5%

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales

Hipótesis alterna No todas las medias son iguales

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	3	4%, 4,75%, 5,5%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	1.222	0.6108	5.79	0.006
Error	39	4.111	0.1054		
Total	41	5.333			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.324688	22.91%	18.95%	10.59%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
4%	14	1.2318	0.2406	(1.0563, 1.4073)
4,75%	14	1.3662	0.2584	(1.1907, 1.5417)
5,5%	14	1.642	0.438	(1.466, 1.817)

Desv.Est. agrupada = 0.324688

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación	
5,5%	14	1.642	A	
4,75%	14	1.3662	A	B
4%	14	1.2318	B	

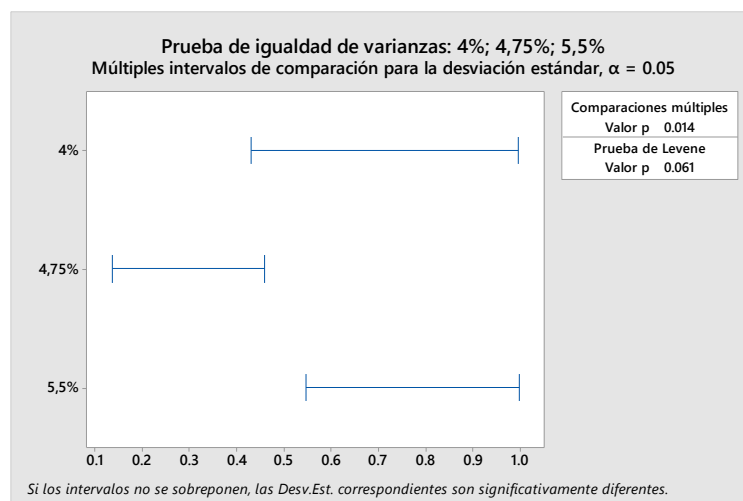
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ICs simultáneos de 95% de Tukey

Gráfica de intervalos de 4%, 4,75%, ...

IRT 5 C

Hay una muestra que no es normal (5,5%)



Prueba de igualdad de varianzas: 4%; 4,75%; 5,5%

Método

Hipótesis nula	Todas las varianzas son iguales
Hipótesis alterna	Por lo menos una varianza es diferente
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
---------	---	-----------	----

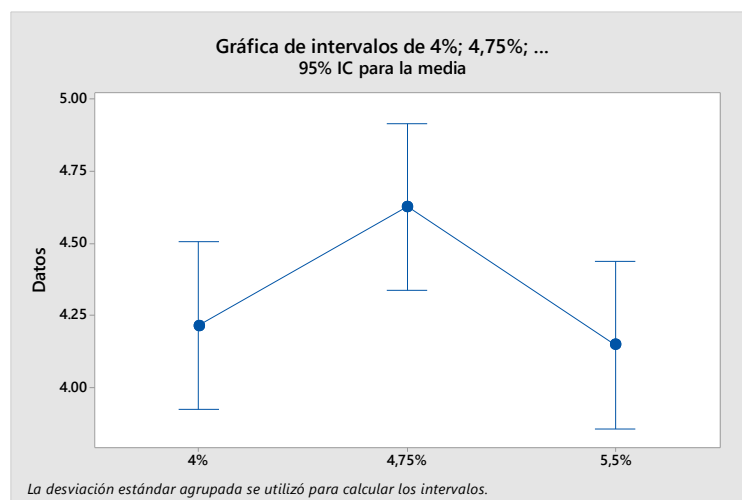
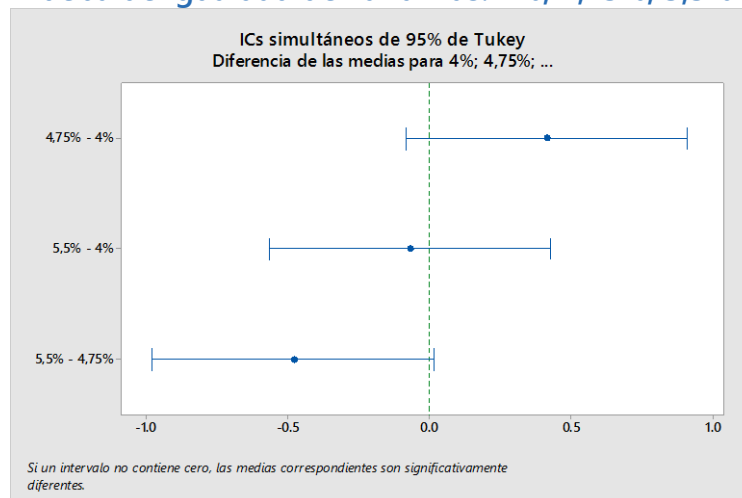
4%	14	0.598475	(0.331127; 1.30479)
4,75%	14	0.229132	(0.171253; 0.36981)
5,5%	14	0.674403	(0.415570; 1.32020)

Nivel de confianza individual = 98.3333%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Comparaciones múltiples	—	0.014
Levene	3.01	0.061

Prueba de igualdad de varianzas: 4%; 4,75%; 5,5%



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
4,75%	14	4.6264	A

4% 14 4.214 A

5,5% 14 4.146 A

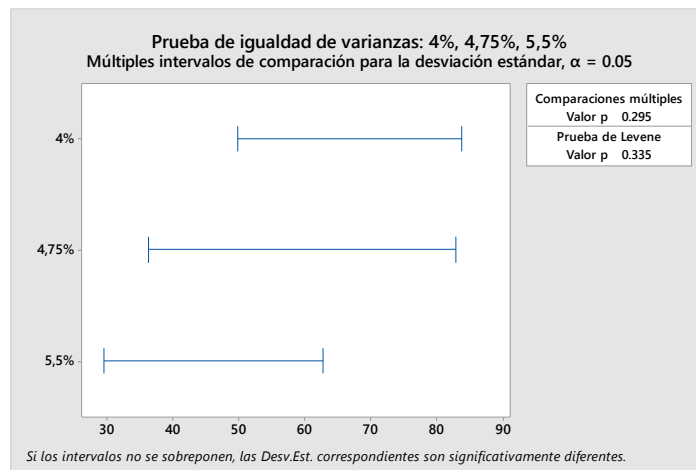
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ICs simultáneos de 95% de Tukey

Gráfica de intervalos de 4%; 4,75%; ...

GF 20 C

Hay una muestra que no es normal (4,75%)



Prueba de igualdad de varianzas: 4%; 4,75%; 5,5%

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
4%	14	58.9588	(39.4778; 106.216)
4,75%	14	50.0602	(27.1140; 111.490)
5,5%	14	39.2936	(25.1452; 74.069)

Nivel de confianza individual = 98.3333%

Pruebas

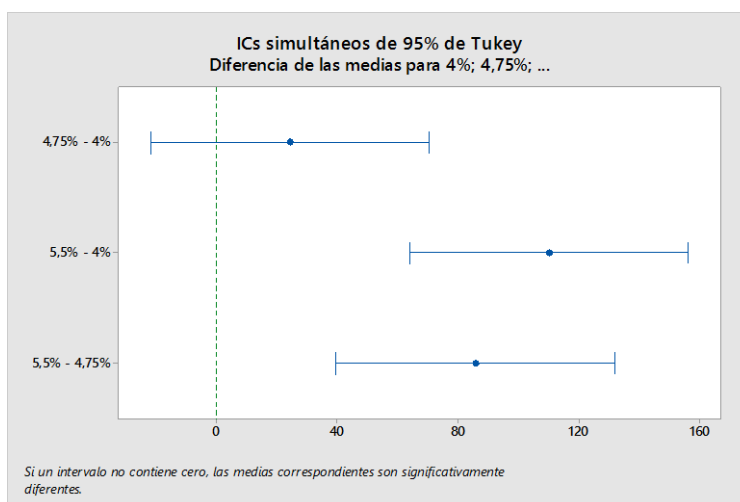
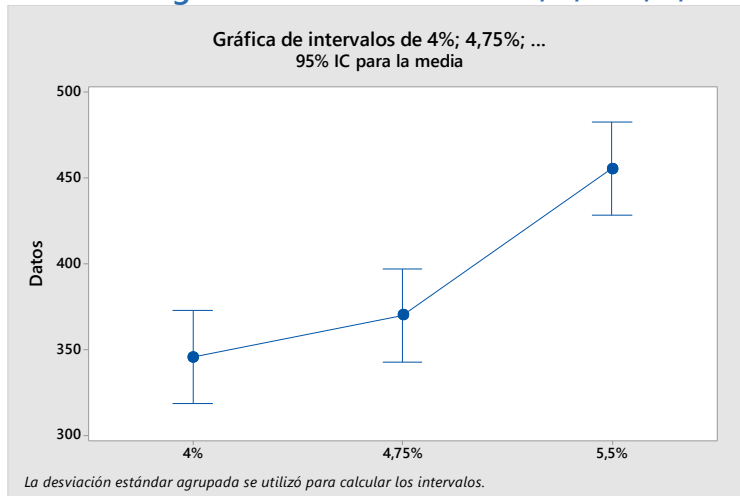
Método	Estadística	Valor p
--------	-------------	---------

de prueba

Comparaciones múltiples — 0.295

Levene 1.13 0.335

Prueba de igualdad de varianzas: 4%; 4,75%; 5,5%



ANOVA de un solo factor: 4%; 4,75%; 5,5%

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales

Hipótesis alterna No todas las medias son iguales

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
--------	---------	---------

Factor	3	4%; 4,75%; 5,5%
--------	---	-----------------

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
--------	----	-----------	-----------	---------	---------

Factor	2	93481	46740	18.63	0.000
Error	39	97840	2509		
Total	41	191321			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
50.0871	48.86%	46.24%	40.69%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
4%	14	345.2	59.0	(318.2; 372.3)
4,75%	14	369.6	50.1	(342.5; 396.6)
5,5%	14	455.2	39.3	(428.2; 482.3)

Desv.Est. agrupada = 50.0871

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

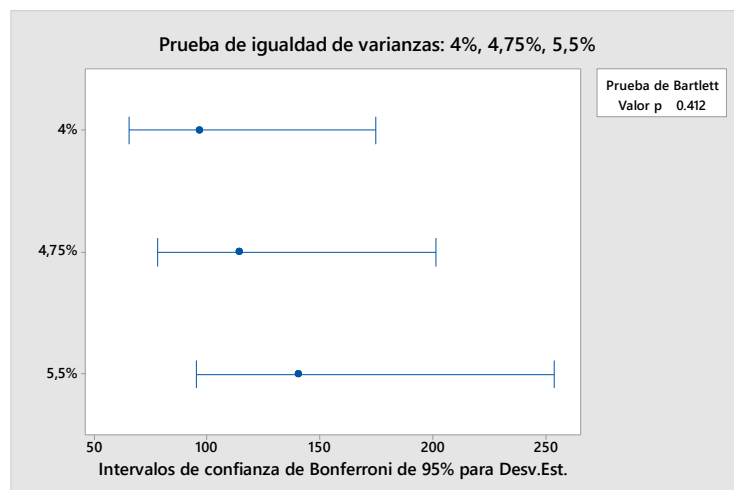
Factor	N	Media	Agrupación
5,5%	14	455.2	A
4,75%	14	369.6	B
4%	14	345.2	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ICs simultáneos de 95% de Tukey

Gráfica de intervalos de 4%; 4,75%; ...

GF 5 C



Prueba de igualdad de varianzas: 4%, 4,75%, 5,5%

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

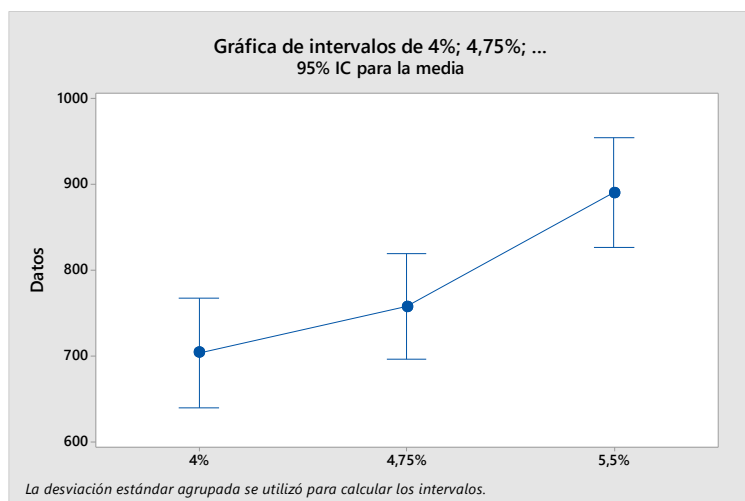
Muestra	N	Desv.Est.	IC
4%	14	96.352	(65.3546, 174.700)
4,75%	15	114.047	(78.2726, 201.252)
5,5%	14	140.100	(95.0279, 254.020)

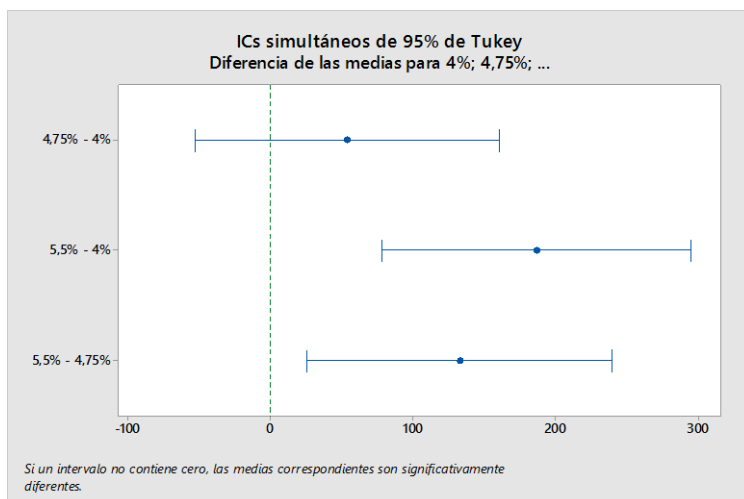
Nivel de confianza individual = 98.3333%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Bartlett	1.77	0.412

Prueba de igualdad de varianzas: 4%, 4,75%, 5,5%





ANOVA de un solo factor: 4%, 4,75%, 5,5%

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales

Hipótesis alterna No todas las medias son iguales

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	3	4%, 4,75%, 5,5%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	258349	129175	9.26	0.000
Error	40	557946	13949		
Total	42	816295			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
118.104	31.65%	28.23%	20.99%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
4%	14	703.1	96.4	(639.3, 766.9)
4,75%	15	756.8	114.0	(695.1, 818.4)
5,5%	14	889.4	140.1	(825.6, 953.2)

Desv.Est. agrupada = 118.104

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

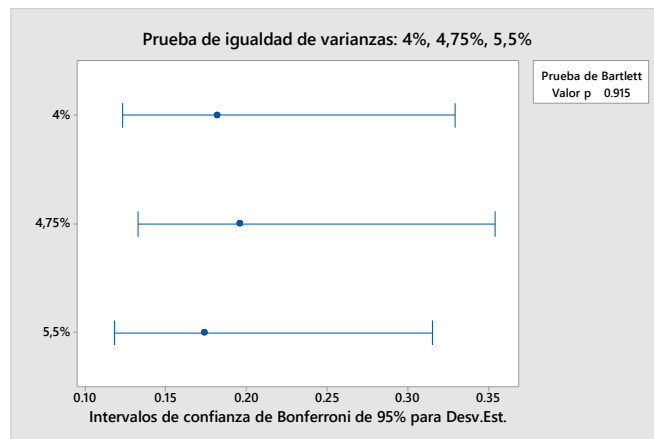
Factor	N	Media	Agrupación
5,5%	14	889.4	A
4,75%	15	756.8	B
4%	14	703.1	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ICs simultáneos de 95% de Tukey

Gráfica de intervalos de 4%, 4,75%, ...

d0,5Pm 20 C



Prueba de igualdad de varianzas: 4%, 4,75%, 5,5%

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
4%	14	0.181664	(0.123220, 0.329381)
4,75%	14	0.195397	(0.132536, 0.354282)
5,5%	14	0.173757	(0.117857, 0.315044)

Nivel de confianza individual = 98.3333%

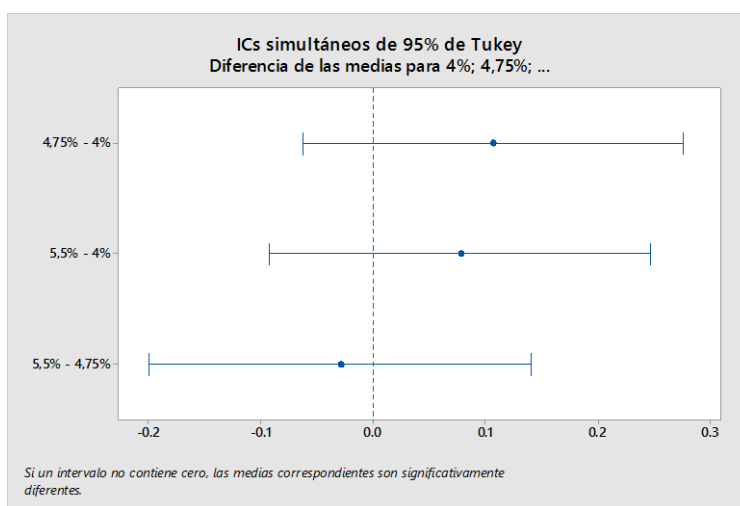
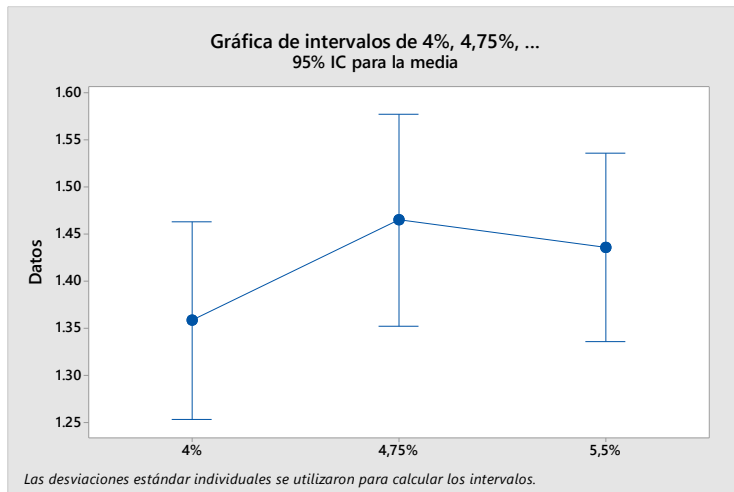
Pruebas

Método	Estadística	Valor p
--------	-------------	---------

de prueba

Bartlett 0.18 0.915

Prueba de igualdad de varianzas: 4%, 4,75%, 5,5%



ANOVA de un solo factor: 4%, 4,75%, 5,5%

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales

Hipótesis alterna No todas las medias son iguales

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
--------	---------	---------

Factor	3	4%, 4,75%, 5,5%
--------	---	-----------------

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	0.08534	0.04267	1.26	0.294
Error	39	1.31785	0.03379		
Total	41	1.40319			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.183823	6.08%	1.27%	0.00%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
4%	14	1.3581	0.1817	(1.2587, 1.4575)
4,75%	14	1.4649	0.1954	(1.3655, 1.5643)
5,5%	14	1.4358	0.1738	(1.3364, 1.5352)

Desv.Est. agrupada = 0.183823

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

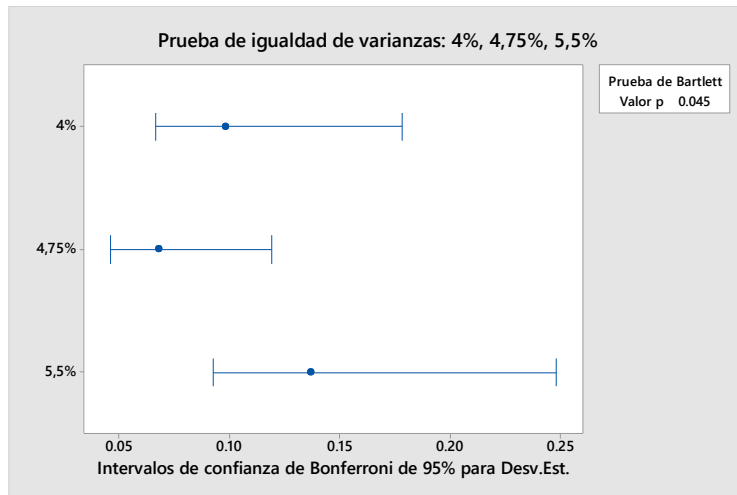
Factor	N	Media	Agrupación
4,75%	14	1.4649	A
5,5%	14	1.4358	A
4%	14	1.3581	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ICs simultáneos de 95% de Tukey

Gráfica de intervalos de 4%, 4,75%, ...

d0,5Pm 5 C



Prueba de igualdad de varianzas: 4%; 4,75%; 5,5%

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
4%	14	0.098246	(0.0666388; 0.178133)
4,75%	15	0.067602	(0.0463967; 0.119294)
5,5%	14	0.136664	(0.0926978; 0.247791)

Nivel de confianza individual = 98.3333%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Bartlett	6.20	0.045

Prueba de igualdad de varianzas: 4%; 4,75%; 5,5%

ANOVA de un solo factor: 4%, 4,75%, 5,5%

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

No se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	3	4%, 4,75%, 5,5%

Prueba de Welch

Fuente	GL		Valor F	Valor p
	Num	GL Den		
Factor	2	24.1473	2.66	0.090

Resumen del modelo

R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
14.32%	10.03%	0.78%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
4%	14	0.6130	0.0982	(0.5562, 0.6697)
4,75%	15	0.5950	0.0676	(0.5576, 0.6325)
5,5%	14	0.6897	0.1367	(0.6108, 0.7686)

Comparaciones en parejas de Games-Howell

Agrupar información utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
5,5%	14	0.6897	A
4%	14	0.6130	A
4,75%	15	0.5950	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ICs simultáneos de 95% de Games-Howell

Gráfica de intervalos de 4%, 4,75%, ...

